



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**LETECKÝ ÚSTAV**

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**KONSTRUKČNÍ NÁVRH BEZPILOTNÍHO  
PROSTŘEDKU VYRÁBĚNÉHO TECHNOLOGIÍ FDM**

DESIGN OF 3D-PRINTED UNMANNED AERIAL VEHICLE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Martin Sladký**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Dvořák**

**BRNO 2019**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Martin Sladký**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Dvořák**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Konstrukční návrh bezpilotního prostředku vyráběného technologií FDM

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní výroba se v poslední době stává velmi rozšířenou, zejména díky technologii Fused Deposition Modelling (FDM) a její open-source implementaci v rámci projektu RepRap. Nedávno došlo též k úspěšné aplikaci technologie FDM pro výrobu modelů letadel; jejich konstrukce je ovšem založena čistě na empirických postupech. Práce má prozkoumat potenciál pro zlepšení stávajících konstrukčních přístupů a aplikovat je na bezpilotním prostředku VUT 714.

### Cíle bakalářské práce:

- Rešerše bezpilotních prostředků vyráběných aditivní technologií
- Studie konstrukčních strategií používaných pro aditivní technologii výroby UAV
- Výsledný konstrukční návrh bezpilotní platformy VUT 714 připravený pro aditivní výrobní technologii

### Seznam doporučené literatury:

COWARD, C. 3D printing. New York, USA: Alpha, 2015. ISBN 978-1615647446.

HORVATH, J. C. Mastering 3D printing. Berkeley, California: Apress, 2014. ISBN 978-1-4842-0025-4.

BARNATT, C. 3D printing: Third Edition. CreateSpace.

Independent Publishing Platform, 2016. ISBN 978-1539655466.

KREJBYCHOVÁ, A. Analýza mechanických vlastností plastových dílů realizovaných 3D tiskem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem bezpilotního prostředku vyráběného technologií FDM. Úvodní část se věnuje stručnému přehledu technologií 3D tisku a rešerši konstrukčních strategií využívaných pro výrobu 3D tištěných letounů. Druhá část se věnuje samotnému konstrukčnímu návrhu. Byly navrženy dva typy wingletů, křídlo a centroplán. Jednotlivé části letounu byly převedeny do formátu G-code a vytištěny na 3D tiskárně. Na závěr proběhlo sestavení letounu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

3D tisk, FDM technologie, bezpilotní prostředek, konstrukční návrh letounu

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the design proposal of the unmanned aircraft produced by FDM technology. The introduction is devoted to a brief overview of 3D printing technologies and the research of design strategies used for the production of 3D printed aircrafts. The second part is devoted to the design itself. Two types of winglets, wing and central part of the aircraft were designed. The individual parts of the aircraft have been converted to G-code format and printed on a 3D printer. Finally, the aircraft was assembled.

## **KEYWORDS**

3D printing, FDM technology, unmanned aircraft, aircraft design proposal

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SLADKÝ, Martin. *Konstrukční návrh bezpilotního prostředku vyráběného technologií FDM*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/115952>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Petr Dvořák.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením Ing. Petra Dvořáka.

V Brně dne 21. května 2019

-----  
Martin Sladký

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Petru Dvořákovi za jeho za ochotu a trpělivost při konzultacích a také za cenné rady a připomínky, kterými obohatil tuto bakalářskou práci. Rád bych poděkoval také za zpřístupnění laboratoří Leteckého ústavu.

Dále bych chtěl poděkovat společnosti 3DLabPrint za poskytnuté podklady a informace. V neposlední řadě bych chtěl velice poděkovat své rodině a blízkým za veškerou podporu a pomoc během celého mého studia.



---

# Obsah

<b>1. Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Projekt VUT 714.....</b>	<b>11</b>
<b>3. Technologie 3D tisku.....</b>	<b>12</b>
3.1. Fused deposition modeling (FDM) .....	12
3.2. Přehled dalších 3D tiskových metod .....	13
3.2.1. Selective Laser Sintering (SLS) .....	13
3.2.2. Stereolitografie (SLA) .....	13
3.2.3. Metoda ZCORP .....	13
3.2.4. Laminted Object Manufacturing (LOM) .....	14
3.2.5. Polyjet Matrix .....	14
3.2.6. Multi Jet Modeling .....	14
3.2.7. Termoplastické vstřikování s frézováním .....	14
3.2.8. Digital Light Projection .....	14
<b>4. Rešerše bezpilotních prostředků a konstrukčních strategií .....</b>	<b>15</b>
4.1. Salsa .....	15
4.2. AMRC UAV.....	16
4.3. Barcelona UAV.....	17
4.4. Aurora UAV.....	19
4.5. Thor .....	20
4.6. 3DLabPrint.....	21
4.7. Scout.....	22
4.8. Shrnutí .....	23
<b>5. Konstrukční návrh bezpilotního letounu VUT 714.....</b>	<b>24</b>
5.1. Použité vybavení .....	24
5.1.1. CAD software.....	24
5.1.2. Slicer .....	24
5.1.3. 3D tiskárny.....	24
5.2. Winglet .....	24
5.3. Křídlo .....	27
5.4. Centropoplán.....	33
5.5. Sestavení letounu .....	37
<b>6. Závěr.....</b>	<b>39</b>
<b>7. Seznam použitých zdrojů.....</b>	<b>40</b>

---

## 1. Úvod

Bezpilotní letouny se tradičně vyráběly především z různých typů dřeva, extrudovaných polymerů nebo laminátu. Poslední roky se ovšem nesou ve znamení velkého nárůstu využití různých technologií 3D tisku. Tato technologie se již běžně využívá v průmyslovém sektoru, kde se úspěšně etablovala jako velice vhodná metoda výroby prototypů, a postupem času si našla své místo i v běžných domácnostech mezi nadšenci a kutily. Jako přirozená se proto jeví myšlenka zkusit vytvořit s pomocí této nové progresivní technologie bezpilotní letoun.

Cílem této bakalářské práce je tedy návrh bezpilotního prostředku, který by byl vyroben vhodnou metodou 3D tisku.

## 2. Projekt VUT 714

Bezpilotní systém VUT 714 je určen ke kolmému multispektrálnímu snímkování krajiny. Sestává se z pozemní a vzdušné části.

Pozemní část je tvořena řídicí stanicí a modulem zajišťujícím bezdrátový přenos telemetrických údajů.

Vzdušná část je tvořena skořepinovou platformou bezocasé konstrukce a palubní elektronikou. Užitečné zatížení je tvořeno dvěma fotoaparáty Sony. Tyto fotoaparáty umožňují kvalitní kolmé snímkování zájmové oblasti.

Finální verze byla vyrobena z laminátu pomocí negativních forem. V této fázi bylo rozhodnuto vyrobit tento letoun také pomocí 3D tisku. [1]

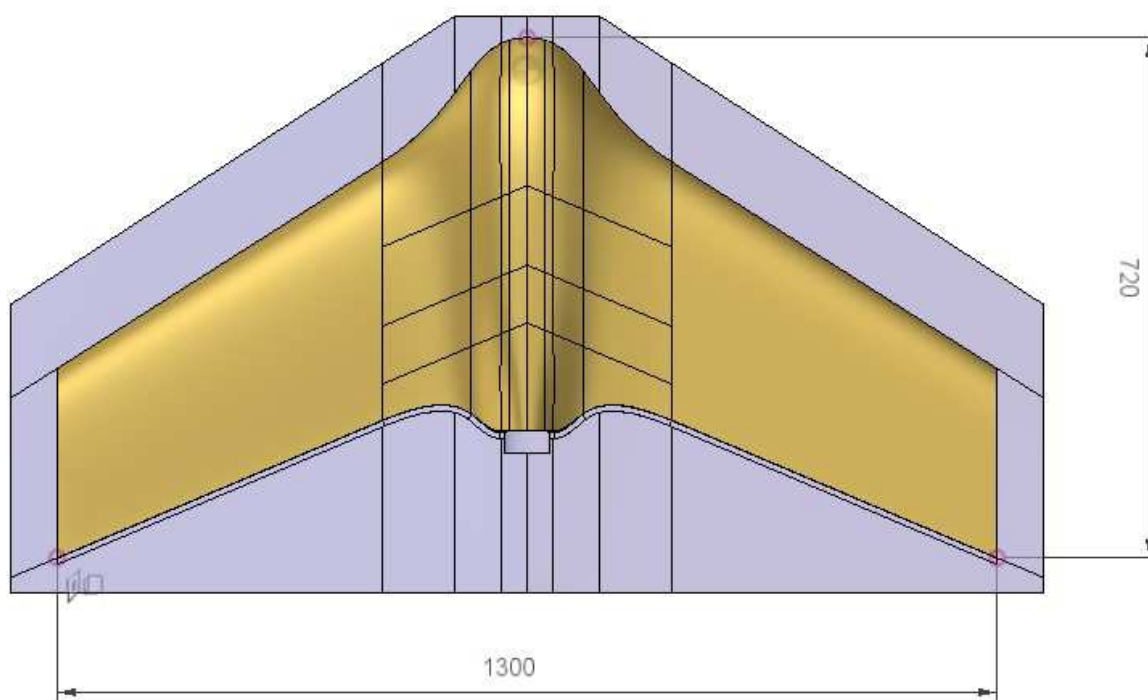
Digitální modely jednotlivých forem, vytvořené v programu CATIA, posloužily jako výchozí bod pro návrh 3D tištěné verze letounu VUT 714. Z dodaných forem bylo zapotřebí zrekonstruovat původní tvar letounu a poté bylo možno začít se samotným konstrukčním návrhem.

Tabulka 2.1. Technická data letounu VUT 714 [1]

Rozpětí s winglety	[m]	1,6
Délka	[m]	0,8
$m_{TOW}$	[kg]	2,5
Platící zatížení	[kg]	0,9
Cestovní rychlost	[m/s]	17
Vytrvalost	[h]	0,9
Výkon	[W]	400



Obrázek 2.1. Laminovaná verze letounu VUT 714



Obrázek 2.2. Vnější obrys letounu VUT 714 uložený v jedné polovině formy

---

### 3. Technologie 3D tisku

Všechna zařízení na výrobu 3D modelů pracují na principu rozložení počítačového modelu do tenkých vrstev a jejich následnému sestavení do reálného modelu v pracovním prostoru tiskárny. Na rozdíl od klasického obrábění se materiál neubírá, ale naopak je po vrstvách přidáván. Model je stavěn na základní desce, která po dokončení každé vrstvy poklesne dolů právě o tloušťku této vrstvy. [2]

Výhody 3D tisku oproti konvenčnímu obrábění se projeví především při výrobě menšího množství dané součásti. Při použití technologie 3D tisku odpadá velká část nákladů spojená s přípravou výrobního procesu. Jedna tiskárna může v daném čase vyrobit mnoho různých součástí. Není zapotřebí vyrábět nové formy nebo speciální tvarové nástroje. Díky tomu bude cena za díl z tisícikusové série a cena za díl z desetikusové série téměř stejná. Další velkou výhodou je možnost průběžně měnit parametry součásti a okamžitě začít vyrábět modifikovanou verzi bez nutnosti zásadní úpravy výrobního procesu. [3]

#### 3.1. Fused deposition modeling (FDM)

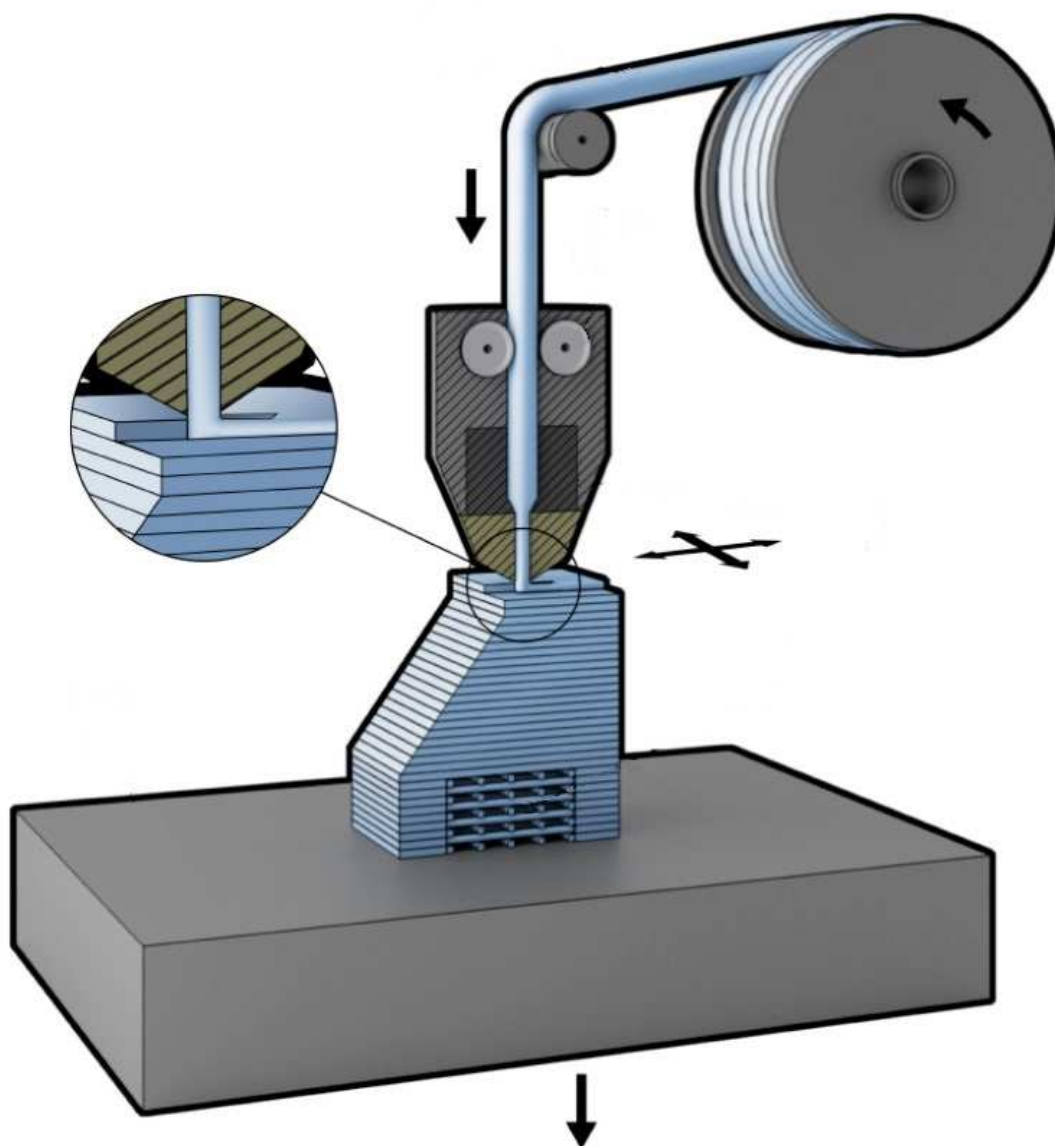
Tuto technologii, která se řadí mezi širokou veřejností nejpoužívanější technologii 3D tisku, vyvinul Scott Crump v roce 1989 s cílem usnadnit proces výroby prototypů. Po tomto objevu založil vlastní společnost Stratasys, která se stala jedním z největších světových producentů 3D tiskáren a do roku 2009 vlastnila všechny potřebné patenty týkající se FDM technologie. Po vypršení těchto patentů se trh otevřel i pro další firmy vyrábějící spotřební 3D tiskárny. [3]

Podstata této technologie spočívá v natavení plastové struny, která prochází skrze rozehřátou trysku, a jejím ukládáním na tiskovou podložku. Stavební materiál je dopravován k tiskové hlavě. Zde se ve speciální tavicí komůrce nahřeje a poté je skrze trysku vytlačen na stavební podložku. Na podložce dochází ke ztuhnutí materiálu a po nanesení jedné vrstvy se stavební podložka sníží o tloušťku této vrstvy a celý proces se opakuje. Po dokončení tisku se výrobek odlomí z podložky a je-li to nutné je následně začištěn a upraven. [4]

Při velmi zjednodušeném pohledu lze použít analogii s tavnou pistolí. Filament by se dal přirovnat k válečku s lepidlem a tisková hlava k samotné pistoli. Tím, že by lepidlem byl nakreslen obrys součásti a po zaschnutí lepidla by byla na tuto zaschlou vrstvu nanесena další vrstva, by časem vznikl finální tvar této součásti.

Mezi největší výhody této technologie patří nízké náklady na pořízení součástí, ze kterých se tiskárna skládá, nižší nároky na přesnost sestavení, jejich mechanická jednoduchost a nízké náklady spojené s pořizováním tiskového materiálu.

Nevýhody této technologie oproti ostatním technologiím 3D tisku jsou nižší rozměrová přesnost vytištěných výrobků, dlouhá doba tisku a různé deformace nebo praskliny, které mohou vzniknout smršťováním jednotlivých vrstev chladnoucího plastu. [3]



Obrázek 3.1. Fused Deposition Modeling [5]

## 3.2. Přehled dalších 3D tiskových metod

### 3.2.1. Selective Laser Sintering (SLS)

Tato metoda je založena na spékání práškového materiálu laserovým paprskem. Pořizovací cena tiskárny je vysoká, ale samotný stavební materiál je oproti ostatním tiskovým materiálům relativně levný. [2]

### 3.2.2. Stereolitografie (SLA)

Tato metoda je založena na vytvrzování tekutého kompozitu laserovým paprskem. Výhodou této technologie je její velká univerzálnost. [2]

### 3.2.3. Metoda ZCORP

Tato metoda je založena na nanášení tenkých vrstev prášku na základní desku. Prášek je poté spojován pojivem, které je vytlačováno z tiskových hlav. Vytisknutý model je křehký a vyžaduje následnou úpravu povrchu. Výhodou je, že lze tisknout i vícebarevné modely. [2]

---

#### **3.2.4. Laminated Object Manufacturing (LOM)**

Tato metoda je založena na vyřezávání jednotlivých vrstev z plastové fólie a následném lepení těchto vrstev k předchozím vrstvám. Mezi výhody patří velmi levný stavební materiál a velmi kvalitní povrch. Nevýhodou je vznik velkého množství odpadu. [2]

#### **3.2.5. Polyjet Matrix**

Tato metoda je založena na vytlačování fotopolymeru tiskovými hlavami a jeho následném vytvrzení pomocí UV záření. Modely vyrobené touto technologií mají velmi kvalitní povrch. [2]

#### **3.2.6. Multi Jet Modeling**

Tato metoda je založena na vytlačování termoplastického materiálu tiskovými hlavami. Využívají se zde dva materiály, tiskový a podpůrný, každý s jinou teplotou tání. [2]

#### **3.2.7. Termoplastické vstřikování s frézováním**

Tato metoda je založena na kombinaci vytlačování termoplastického materiálu s horizontálním frézováním. [2]

#### **3.2.8. Digital Light Projection**

Tato metoda je založena na nasvícení fotopolymeru UV projekcí modelového řezu. [2]

---

## 4. Rešerše bezpilotních prostředků a konstrukčních strategií

Historicky se RC modely vyráběly z různých materiálů.

Materiál s nejdelší tradicí je dřevo nejčastěji balzové borové nebo smrkové. Základní konstrukce byla často doplněna potahem ze speciálního modelářského papíru nebo látky. Velkou výhodou byla snadná dostupnost těchto materiálů a jejich nízká pořizovací cena. K sestavení letounu ale bylo zapotřebí určité manuální zručnosti a velmi obtížná byla také oprava letounu po havárii.

Prudký rozvoj umělých hmot způsobil, že se jejich uplatnění začalo hledat i ve výrobě RC modelů. Mezi velmi často využívané materiály patří pěnový polystyren, pěnový polyuretan nebo extrudovaný polypropylen. Na více namáhané části letounu lze využít například polyamidy. Výhodou pěnových materiálů je, že části letounu, z nich vyrobené, jsou prakticky nezničitelné. Například polypropylen lze snadno lepit speciálním lepidlem a deformované části tvarovat po nahřátí horkou vodou. Nevýhodou je obtížný proces výroby samotného dílu, který se musí obrobit z předem připraveného bloku materiálu nebo vypěnit ve speciální kovové formě.

Materiál s velmi dobrými vlastnostmi je laminát. Tento materiál lze dobře opracovávat, lepit i povrchově upravovat. Nevýhodou je obtížný proces výroby samotného dílu. Nejprve je třeba vyrobít speciální formu a pro získání kvalitního výrobku je třeba mít určité zkušenosti. Tato technologie je velmi vhodná pro hromadnou výrobu osvědčené součásti. [6]

Technologie 3D tisku by mohla spojit některé užitečné vlastnosti předchozích postupů. 3D tištěný letoun lze snadno sestavit a slepení jednotlivých dílů připravené stavebnice není obtížné ani pro začínající modeláře. Jednotlivé díly modelu se po zničení dají velice snadno nahradit. Pro výrobu tištěných letadel není třeba žádná speciální forma nebo nástroje a na jedné tiskárně lze vyrobit velké množství naprosto odlišných letounů. Zkušenější modeláři, kteří již pronikli do problematiky 3D tisku a základních pravidel mechaniky letu, si mohou ve volně dostupných softwarech letouny upravovat nebo si navrhnout letoun vlastní.

Z těchto důvodů se technologie 3D tisku jeví jako perspektivní technologie výroby bezpilotních letounů, a proto se jí bude zabývat i tato práce. Dále následuje přehled bezpilotních letounů vyráběných aditivní technologií, z nichž bylo možno získat inspiraci pro finální návrh letounu VUT 714.

### 4.1. Sulsa

Southampton University Laser Sintered Aircraft (Sulsa) byla vytvořena inženýry z Univerzity v Southamptonu roce 2011 jako první plně tisknutelné unmanned air vehicle (UAV) na světě. Hlavními cíli projektu byly návrh bezpilotního průzkumného letounu a ověření možností 3D tisku při výrobě tohoto UAV.

Letoun Sulsa ještě nebyl vyráběn klasickou FDM technologií, byl vyráběn pomocí metody selective laser sintering (SLS) z nylonu.

Díky SLS metodě mohli inženýři využívat techniky a nápady, které by byly pro konvenční výrobu příliš nákladné. Příkladem může být geodetická struktura podpěr, která byla inspirována letounem Vickers Wellington, nebo eliptické křídlo, které má lepší aerodynamické vlastnosti než křídlo obdélníkové.

Uvnitř křídla se nachází pravidelná geodetická síť podpěr, které zaručují dostatečnou pevnost křídla. Letoun se skládá celkem ze čtrnácti částí. Letadlo využívá jeden tlačný

elektrický motor, celkové rozpětí je 1,2 m a maximální rychlost se pohybuje kolem 160 km/h. [7, 8]

V roce 2015 byl letoun zařazen do výbavy britského královského námořnictva s potenciálem nahradit průzkumné letouny, které námořnictvo dříve využívalo. První testy prodělal letoun v oblasti Antarktidy a příslušníci královského námořnictva byli s výsledky spokojeni. Největší výhodou letounu Sulsa oproti standardním průzkumným letounům je jeho velmi nízká pořizovací cena. [9]

Letoun Sulsa také posloužil jako vzor pro návrh 3D tištěného vesmírného letounu Vulture 2, který navrhli studenti z Univerzity v Southamptonu. [10]



Obrázek 4.1. Sulsa [7]

Velmi podobná vnitřní struktura křídla byla použita i při návrhu letounu VUT 714. Uvnitř křídla VUT 714 se také nachází pravidelná geodetická síť podpěr, které při pohledu shora vytvářejí pravidelnou čtverečkovou síť. Rozdílná je velikost těchto čtverečků a tvar odlehčovacích otvorů ve struktuře.

## 4.2. AMRC UAV

Tým inženýrů z konstrukční a prototypové skupiny Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC) ve spolupráci se Sheffieldskou univerzitou vytvořil v roce 2014 prototyp bezpilotního letadla AMRC UAV. Důvodem, proč bylo rozhodnuto použít 3D tisk byla snaha o zjednodušení výroby a zkrácení výrobního času.

Technologie FDM byla ze všech možností 3D tisku vybrána díky nízkým pořizovacím nákladům a nižším nákladům na tiskový materiál ABS-M30, kterého bylo použito při výrobě. Díky využití FDM technologie se čas, potřebný k výrobě letounu, zkrátil ze 120 na 24 hodin.

Celý drak letadla byl od začátku konstruován pro výrobu pomocí aditivní technologie. Jako optimální konfigurace bylo zvoleno samokřídlo. Mezi důvody, které nakonec



vedly ke zvolení samokřídla namísto standardní konfigurace patří aerodynamické výhody, možnost využití symetrie letounu a snazší tisk na FDM tiskárně. Pro optimalizaci geometrie byla použita metoda Computational Fluid Dynamics (CFD). Celá konstrukce byla rozdělena na devět částí, které se tisknou odděleně. Obě poloviny křídla jsou spojeny jednou výztuhou bez dalších přídatných nebo upevňovacích částí. Křídélka jsou navržena tak, aby se mohla připevnit na závěsy vyčnívající z vnější části křídla a každé je ovládáno vlastním servem.

Vnitřní struktura letounu je tvořena poloskořepinou. Konstrukce je navržena tak, aby žádná z devíti částí, na které je letadlo rozděleno, nepotřebovala žádné výztuhy z podpůrného materiálu, které by se po vytištění musely odstranit. Nevýhodou tohoto řešení je, že celá konstrukce je omezena minimálním úhlem, který musí svírat tisková podložka a konstrukce letounu. Bude-li tento úhel menší, konstrukci nebude možno vytisknout. Rozpětí letounu je 1,5 m a váží zhruba 2 kg.

Letoun byl zalétáván na svahu jako kluzák a po vyhodnocení tohoto zkušebního letu bylo ověřeno, že je velmi stabilní a má dobré aerodynamické vlastnosti.

Dalším cílem týmu AMRC je optimalizace draku letadla pomocí kombinovaných wingletů, získání palubního záznamu letových parametrů a autonomní provoz pomocí GPS. [11]



Obrázek 4.2. bezpilotní letoun skupiny AMRC [11]

Symetrie byla využita i při návrhu letounu VUT 714. Díky využití této symetrie nebylo zapotřebí modelovat celý letoun, ale stačilo vymodelovat pouze levou polovinu. Pravá polovina byla vytvořena zrcadlením levé poloviny letounu. Využití této symetrie při návrhu vedlo ke značné úspoře času.

### 4.3. Barcelona UAV

Jonatan Domènech Arboleda, student leteckého inženýrství na Universitat Politècnica de Catalunya v Barceloně, vytvořil v roce 2014 bezpilotní letoun Barcelona UAV.

Hlavním cílem projektu bylo prokázat, že lze využít spotřebitelsky běžně dostupnou technologii 3D tisku k výrobě bezpilotního letounu.

Jako výrobní materiál byl použit standardní bílý PLA, který byl mimo jiné vybrán i pro jeho velmi snadnou biologickou odbouratelnost.

Samotná konstrukce se musela přizpůsobit jak nárokům FDM technologie jako takové, tak i omezené velikosti tiskových ploch spotřebitelských, běžně dostupných 3D tiskáren. Proto musel být letoun rozdělen až na třicet částí.

Autorovi se osvědčilo lepit jednotlivé části přímo zbylým materiálem PLA, který pomocí páječky nahříval a poté nanášel do jednotlivých spojů.

Autor zvolil klasickou konfiguraci letounu s trupem, který je složen ze tří částí. Celá konstrukce je navržena tak, aby při tisku nebylo třeba žádných podpor, které by se musely po vytištění odstranit.

Výsledný model letounu neobsahuje žádnou vnitřní strukturu, skládá se pouze z vnějšího povrchu a konstrukčních prvků nutných k sestavení letounu a osazení ovládacích prvků. Samotnou vnitřní strukturu generuje automaticky tiskárna, která letoun tiskne. Jednotlivé díly jsou lepeny natupo. Rozpětí letounu je 1,5 m hmotnost je pouze 845 g a celkový čas potřebný k vytištění je zhruba 38,5 h.

Autor porovnával své letadlo i s bezpilotním RC letounem od firmy Multiplex, který byl vyroben z extrudovaného polypropylenu (EPP). Hlavní porovnávací kritérium bylo plošné zatížení křídel. U letounu Barcelona UAV tento poměr vyšel jen mírně horší než u letounu společnosti Multiplex a byl zhruba dvakrát až třikrát lepší než u ostatních 3D tištěných UAV. 3D tisk navíc vychází jako zdaleka nejlevnější výrobní technologie.

Dalším cílem autora je zlepšení technologie spojování jednotlivých částí letounu, odlehčení některých dílů konstrukce a využití anizotropních materiálů při výrobě. [12, 13]

Celý letoun je zdarma ke stažení na stránkách thingiverse. [14]



Obrázek 4.3. bezpilotní letoun Barcelona UAV [14]

Technologie tisku vnitřní struktury bez přídavných podpor byla využita i při návrhu letounu VUT 714. Využití tisku bez přídavných podpor je nutné ve chvíli, kdy by tyto podpory nebylo možné po vytištění odstranit bez poškození modelu. Při výrobě letounu VUT 714 bylo možno využít pouze podpory vytvořené ze stejného materiálu jako samotný model a díky geometricky velice složité vnitřní struktuře by nebylo možné tyto podpory odstranit. Proto tyto podpory využity nebyly.

#### 4.4. Aurora UAV

Společnosti Stratasys a Aurora Flight Sciences vytvořily v roce 2015 letoun, který je z osmdesáti procent vytištěn na 3D tiskárně. Jedná se o vůbec první 3D tištěný letoun s tryskovým pohonem. Primárním cílem obou společností bylo vyzkoušet možnosti použití tryskových motorů ve 3D tištěných letounech a zároveň ukázat jak rychle se dá přejít od návrhu k hotovému letadlu.

Při výrobě byly použity nejnovější tiskové materiály ASA od společnosti Stratasys. Díky využití tohoto materiálu, který má velmi dobrou schopnost přemostit duté díly, bylo nutno použít menší množství vnitřní výplně.

Využití 3D tisku dodalo inženýrům možnost návrhu mnohem komplexnějších vnitřních struktur letounu. Při návrhu byla využita optimalizace topologie letounu, která se co nejvíce snažila napodobit složité struktury nalezené v přírodě. Tato metoda umožnila přesně lokalizovat, jaké množství materiálu je v daném místě zapotřebí. Svoboda návrhu, kterou 3D tisk umožnil navíc pomohla inženýrům přesně umístit těžiště letounu do potřebného místa.

Mezi části, které byly tištěny pomocí FDM metody, patří křídla, trup, nákladový modul a mechanismus regulující tah letadla. Další součásti, které nešlo vyrobít standardní FDM technologií, byly vyrobeny pomocí jiných aditivních metod. Pomocí metod 3D tištění kovů byly vytištěny i některé části motoru. Pomocí metody laser sintering byla z nylonu vyrobena palivová nádrž.

Vnitřní struktura křídla je tvořena pravidelnou strukturou, která při pohledu na rovinu profilu křídla tvoří pravidelné rovnostranné šestiúhelníky. Křídlo je navíc dalšími nosníky, rovnoběžnými s náběžnou hranou, rozděleno na menší části a šestiúhelníky v každé části mají jinou velikost. Letoun má rozpětí 2,9 metrů, hmotnost 14,5 kg, motor o tahu 98 N a nejvyšší letová rychlost přesahuje 240 km/h.

Dalším cílem obou společností je postupná propagace a zvyšování zájmu o 3D tištěná letadla. Obě společnosti chtějí poukazovat na výhody těchto letadel a snaží se poukázat na možnosti využití těchto letounů ve vojenských i civilních oblastech. [15, 16]



Obrázek 4.4. bezpilotní letoun Aurora UAV [17]

## 4.5. Thor

V listopadu roku 2015 představila společnost Airbus svoje první 3D tištěné letadlo, Thor. Letoun vyvinuli inženýři z centra aplikovaného leteckého výzkumu v Hamburku. Jak napovídá už sám název letounu, slovo Thor je složeno z počátečních písmen výrazu Testing High-tech Objectives in Reality, inženýři se především snažili vyzkoušet nové technologie a postupy jako jsou aerodynamická zlepšení, 3D tištěné konstrukční díly a umělá inteligence.

Materiál, ze kterého jsou vyrobeny všechny části letounu, kromě nezbytné elektrotechniky, je na bázi polyamidů. Metoda 3D tisku je na bázi SLS. [18]

Koncepce letounu Thor byla zvolena tak, aby vyhovovala požadavku na letoun, který umožní nízkorozpočtový a rychlý vývoj různých technologií v reálných letových podmínkách a nepředstavuje skutečný dizajn letadla, který by Airbus zvažoval. I přesto Thor na první pohled připomíná středně velké a velké dopravní letouny, na které se Airbus specializuje. Konkrétně byla zvolena koncepce hornoplošníku se dvěma motory o výkonu 1,5 kW. Při vývoji tohoto letounu získala společnost Airbus několik patentů. [19]

Vnitřní struktura křídla je tvořena výztuhami, které tvoří síť pravidelných šestiúhelníků. Letoun má rozpětí 4 m, váží zhruba 21 kg a je složen ze zhruba šedesáti částí. Lze ho vytisknout za sedm týdnů a další týden je potřeba na jeho sestavení. [20]

Budoucnost letounu Thor leží v testování různých pokročilých konceptů. Nové verze počítají s vyměnitelnými křídly, které budou mít nosnou konstrukci ve tvaru šestihranu a vyrobeny budou z plastů vyztužených uhlíkovými vlákny. Dále se počítá s využitím umělé inteligence. Cílem je naučit letoun samostatně přistávat identifikovat možné překážky na přistávací dráze a nechat ho vyhodnotit, zda je přistání v daný okamžik bezpečné nebo nikoli. Vývojáři Airbusu nazývají tento trend THOR mentality. [21]



Obrázek 4.5. bezpilotní letoun Airbus Thor [19]



## 4.6. 3DLabPrint

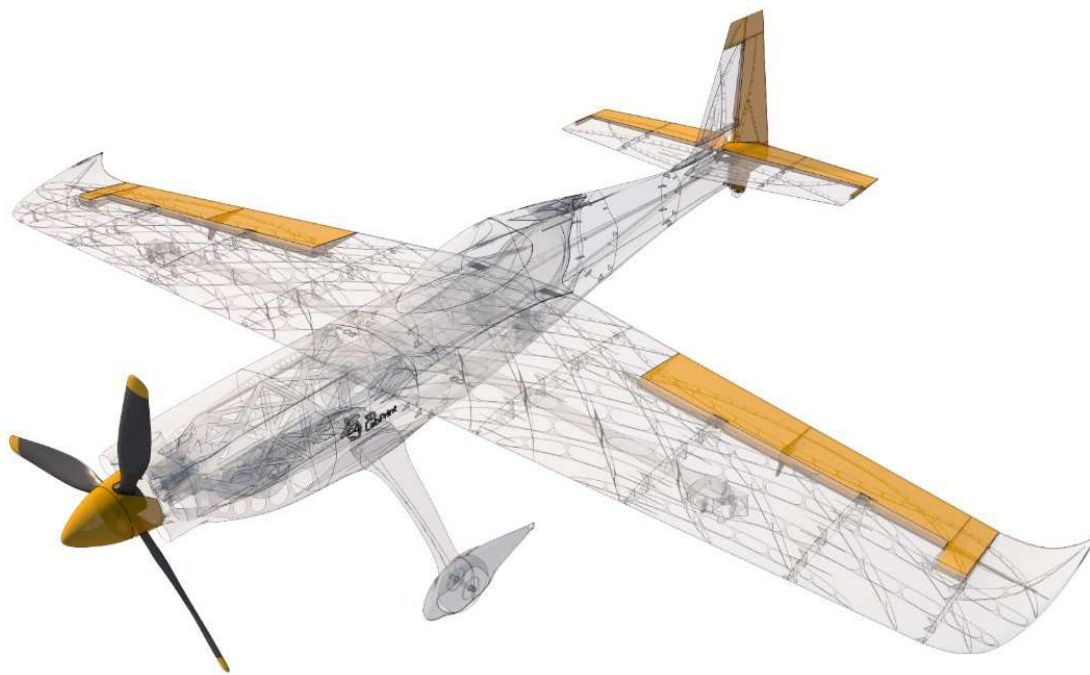
Společnost 3DLabPrint byla založena v Brně v roce 2015. Zabývá se navrhováním 3D tištěných maket historických letounů určených hobby modelářům a zájemcům o RC modely letadel. Na jejich stránkách si zákazník může koupit připravený model ve formátu STL a G-code, který poté jednoduše nahraje do své domácí tiskárny a vytiskne podle předem připraveného návodu. Zdatnější modeláři mají také možnost upravit si dodané STL soubory tak, aby letoun vyhovoval přesně jejich představám a poté si potřebné G-code soubory vygenerovat sami na základě vlastních zkušeností s 3D tiskem.

Společnost 3DLabPrint doporučuje tisknout svoje letouny z materiálu PLA, ale prakticky je na každém zákazníkovi z čeho si chce letoun vytisknout.

Koncepce jednotlivých letounů je vždy přizpůsobena historickým reáliím tak, aby modely vypadaly co nejvěrohodněji. Drobné konstrukční detaily jako například uchycení křidélek, výškového a směrového kormidla nebo způsob děrování výztuh v křídlech se postupem času stále optimalizují a každý další model je o něco propracovanější než ten předchozí.

Letouny společnosti 3DLabPrint mají rozpětí zhruba od jednoho do dvou metrů.

Některé RC makety společnosti 3DLabPrint se zúčastnily několika mezinárodních modelářských soutěží a ukázalo se, že co se letových vlastností týče, mohou konkurovat světové špičce v oboru. [22]



Obrázek 4.6. vnitřní struktura Zivko EDGE [23]

V průběhu zpracovávání této bakalářské práce byl navázán kontakt s panem Štěpánem Dokoupilem, jedním ze zakladatelů společnosti 3DLabPrint. Jím poskytnuté rady a veškerá potřebná technická dokumentace k několika letounům byly velmi přínosné pro vytvoření návrhu letounu VUT 714.

Z letadel, které vytvořila společnost 3DLabPrint, bylo pro výsledný konstrukční návrh letounu VUT 714 čerpáno nejvíce. Podle jejich vzoru bylo navrženo uchycení křidélek ke křídlu, velikost a hustota odlehčovacích otvorů v jednotlivých nosnících nebo geometrie výčnělků usnadňujících lepení jednotlivých segmentů křídla.

## 4.7. Scout

S rostoucí přístupností FDM technologie pro obyčejné modeláře a kutily, roste zájem o vytváření vlastních, originálních, RC letounů. Na různých modelářských fórech, na stránkách thingiverse a mnohých dalších postupně přibývá letounů, určených na 3D tisk, které sem nahráli často anonymní autoři a kdokoli si je může zdarma stáhnout a vytisknout. Tyto stránky se pak mohou stát mimo jiné zdrojem informací pro ty, kteří by rádi s 3D tiskem začali. Nicméně kvalita modelů je různá a to, jestli je letoun kvalitní nebo nikoli, lze často poznat až po vytištění. Výhodou však je, že si model každý může bez větších problémů upravit tak, aby vyhověl jeho požadavkům.

Příkladem takového letounu může být třeba model Nomad, který je zdarma ke stažení na stránkách thingiverse. [24]

Právě tento model si stáhl desátník americké námořní pěchoty Rhet McNeal a přetvořil ho na letoun Scout, který by se jednoho dne mohl stát běžnou výbavou americké armády. Desátník McNeal vytvořil svůj letoun především proto, že UAV, které do té doby námořní pěchota využívala, byly extrémně drahé a málo využívané. Cena jednoho staršího letounu se pohybovala v řádech desítek tisíc dolarů. McNeal vyrobil své letadlo zhruba za 600 dolarů.

Materiál, použitý při výrobě byl na pryskyřičné bázi.

Koncept letounu Scout vycházel z letounu Nomad a na první pohled nejsou patrné žádné větší odchylky.

Struktura křídla původního letounu je tvořena pouze několika plnými nosníky, které jsou kolmé na rovinu profilu i na rovinu křídla a táhnou se od trupu až ke konci křídla. Uvnitř křídla se navíc nachází otvor pro uhlíkovou tyčinku, která by měla křídlo zpevnit. Rozpětí letounu je 1,37 m, hmotnost zhruba 1,8 kg.

Další úpravy letounu poté proběhly v armádních laboratořích aplikovaného výzkumu. Vývoj letounu dále směřuje k jeho lepšímu přizpůsobení bojovým podmínkám, získání dalších certifikací a případné širší produkci. [25]



Obrázek 4.7. Scout [26]

Stejný CAD software, který používal desátník McNeal, Fusion 360 od společnosti Autodesk, byl použit i konstrukčním návrhu letounu VUT 714.

## 4.8. Shrnutí

Tabulka 4.1. Přehled základních charakteristik jednotlivých letounů, citováno výše v textu

		Sulsa	AMRC	Barcelona UAV	AURORA
rozpětí	[m]	1,2	1,5	1,5	2,9
hmotnost	[kg]	3	2	0,845	14,5
materiál	[ - ]	nylon	ABS	PLA	ASA
technologie	[ - ]	SLS	FDM	FDM	FDM

		Thor	Zivko Edge	Scout
rozpětí	[m]	4	1,187	1,37
hmotnost	[kg]	21	0,78	1,8
materiál	[ - ]	polyamid	PLA	pryskyřice
technologie	[ - ]	SLS	FDM	FDM

Při tvorbě konstrukčního návrhu bezpilotního letounu VUT 714 bylo využito samonosné konstrukce a tisku bez přídatných podpor stejně jako u letounu Barcelona UAV, AMRC a dalších. Byla využita stejná rovina symetrie jako v případě letounu AMRC. Vnitřní struktura křídla byla zvolena na základě vnitřní struktury křídla letounu Sulsa. CAD software využitý při návrhu letounu VUT 714 byl stejný jako software využitý při návrhu letounu Scout. Jako nejvýhodnější se ale ukázalo vycházet z konceptů letounů společnosti 3DLabPrint. Jejich letouny prošly několikaletým vývojem, byly zakoupeny a vytištěny velkým množstvím modelářů a postupně zlepšovány i na základě jejich zpětné vazby. Zakladatel společnosti Štěpán Dokoupil navíc poskytl několik posledních letounů i s veškerou dokumentací, takže byla možnost zblízka si prohlédnout a přeměřit všechny části letounu a z těchto poznatků potom vycházet, což u ostatních letounů, u kterých byly k dispozici pouze na obrázky a slovní popis, nebylo možné. Koncepce závěsů křidélek, koncepce děrování výztuh, koncepce spojování jednotlivých dílů křídla a další byly vytvořeny na základě podkladů společnosti 3DLabPrint a upraveny pro konkrétní použití na konceptu VUT 714.

---

## 5. Konstrukční návrh bezpilotního letounu VUT 714

### 5.1. Použité vybavení

#### 5.1.1. CAD software

Jako 3D modelovací CAD software byl zvolen software Fusion 360. Jedná se o nejnovější 3D CAD, který vytvořila společnost Autodesk. Program obsahuje základní prostředí pro parametrické modelování, volnoplošné modelování, práci s plochami, práci s plechy, prostředí pro simulaci pomocí metody konečných prvků a prostředí pro přípravu výroby součástí. Přípravě prostředí pro výrobu součástí věnovali vývojáři velkou pozornost a mimo jiné se zaměřili i na možnost snadného generování souborů určených pro 3D tisk. Mezi další velké výhody tohoto programu patří volně dostupná studentská licence, která neobsahuje žádná funkční omezení, velmi intuitivní uživatelské prostředí podobné známému programu Inventor nebo možnost otevírat soubory z mnoha jiných CAD programů. Mimo jiné i z programu CATIA, ve které byl vytvořen i původní návrh letounu VUT 714. [27, 28]

#### 5.1.2. Slicer

Jako Slicer byl využit software Simplify3D. Tento program byl zvolen na základě doporučení pana Štěpána Dokoupila ze společnosti 3DLabPrint. Jím poskytnuté materiály vztahující se k nastavení jednotlivých parametrů různých procesů 3D tisku byly zpracovány právě v tomto programu, a proto bylo rozhodnuto využít program Simplify3D a nesnažit se převádět tyto procesy do jiného sliceru.

#### 5.1.3. 3D tiskárny

Celý letoun byl vytištěn na dvou 3D tiskárnách. Na tiskárně Original Prusa i3 MK3S a Raise3D PRO2 PLUS.

Tiskárna Original Prusa i3 MK3S je nástupcem světově oceňovaného modelu Original Prusa i3 MK2. Oproti předcházející verzi má vylepšený extruder, řadu nových senzorů, magnetickou vyhřívanou tiskovou podložku, zvýšenou tuhost rámu a další drobná vylepšení. Podporuje základní materiály jako jsou PLA, ABS, PETG, Nylon, ASA a další. Průměr trysky je 0,4 mm a průměr struny 1,75 mm. Tiskový prostor má rozměry 250x210x210 mm. [29, 30]

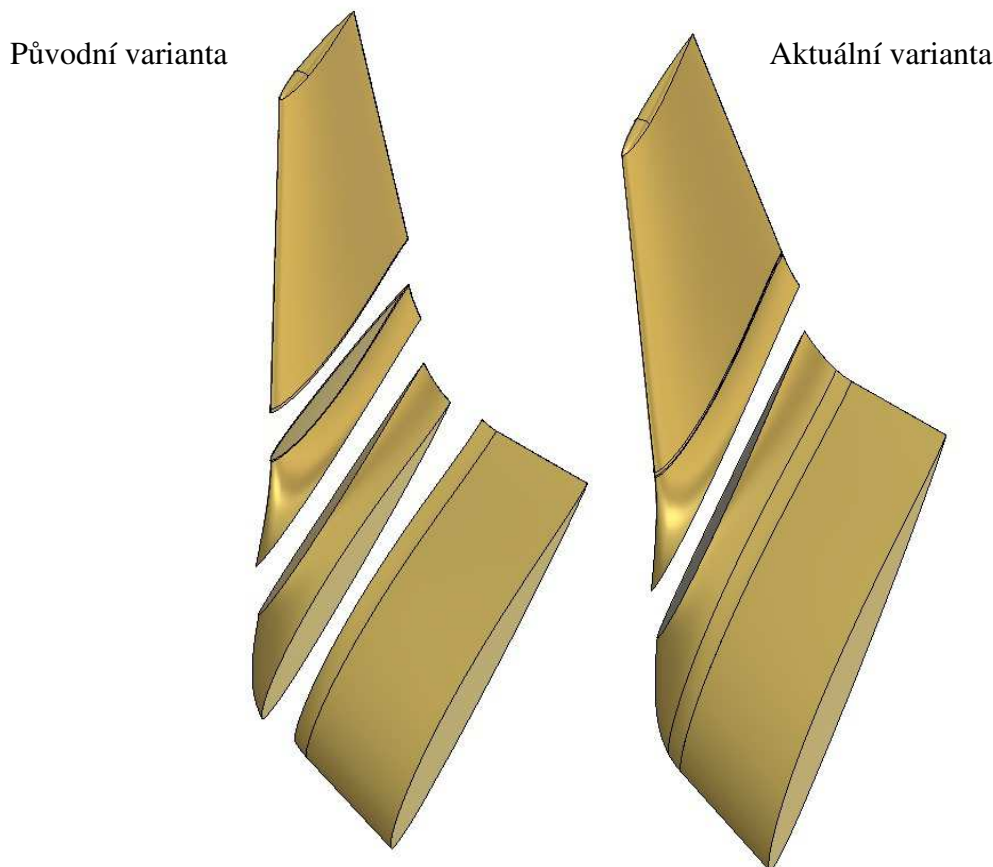
Tiskárna Raise3D PRO2 PLUS je průmyslová, dvouextruderová tiskárna, která je připravena pro malosériovou výrobu. Umožňuje nepřetržitý tisk s vysokou spolehlivostí s využitím široké škály materiálů. Podporuje základní tiskové materiály jako je například PLA, ABS, PETG, Nylon a další. Průměr trysky je 0,4 mm a průměr struny 1,75 mm. Tiskový prostor má rozměry 305x305x600 mm. [31]

### 5.2. Winglet

První navrženou částí letounu byly winglety. Jako první byly vybrány, protože se jedná o jediné odnímatelné části původního letounu. Díky tomu bylo možno lépe porovnávat vytištěné části s laminátovou verzí z hlediska hmotnosti. Dále by se tištěné winglety daly využít v případě ztráty nebo znehodnocení laminátových wingletů. A v případě, že by se navíc povedlo vytisknout winglety lehčí, než jsou stávající laminátové, tu byla možnost natrvalo nahradit stávající winglety tištěnými a odlehčit tak celé letadlo.



V prvním kroku byl winglet namodelován a rozdělen celkem na čtyři samostatně tisknutelné části, jak je vidět na levém obrázku. Po vytištění se však tato koncepce ukázala jako zbytečně složitá, a proto byla nakonec zjednodušena a ve finální verzi se winglet skládá pouze ze dvou částí, jak je vidět na pravém obrázku.



Obrázek 5.1. Tiskové části wingletu

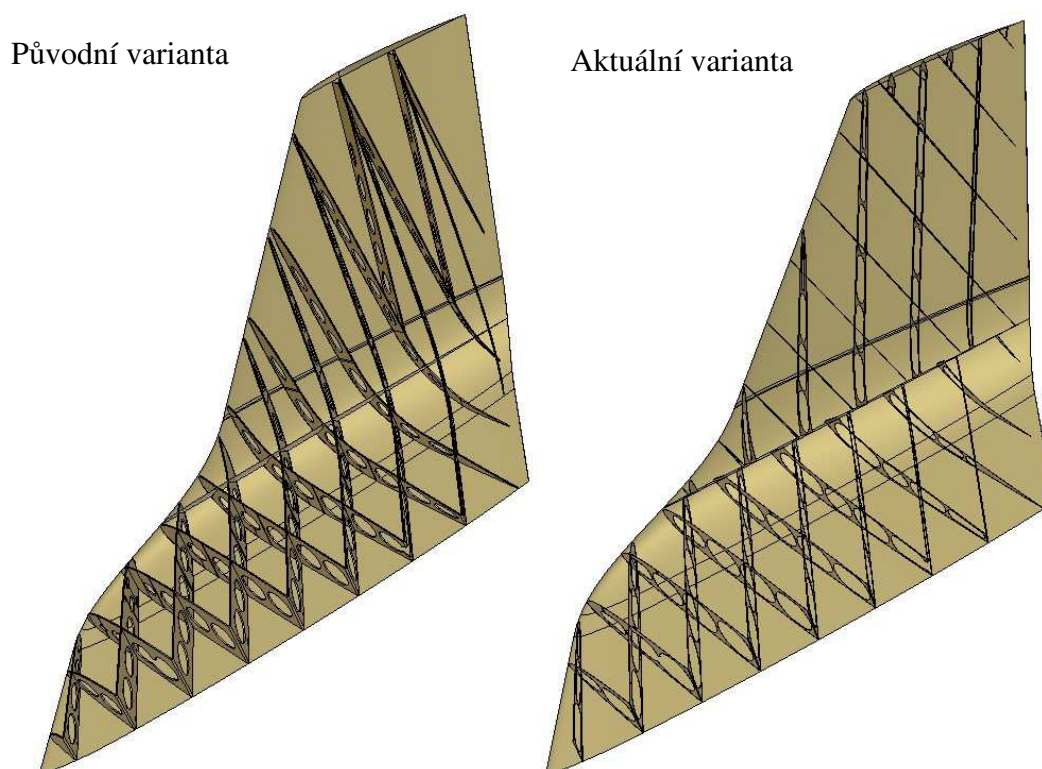
Obě verze wingletu se vždy tisknou od spodního dílu k hornímu a každý díl leží na podložce vždy rovinou profilu bližší ke zbytku letounu.

Tato finální koncepce má nevýhodu v tom, že vrchní část wingletu není kolmá k tiskové podložce jako spodní, ale tiskne se vůči podložce na šikmo, což způsobuje nejhorší kvalitu povrchu na celém letounu. Bylo rozhodnuto vyzkoušet zda by jiný materiál než PLA nezajistil lepší kvalitu povrchu. Ukázalo se, že využití materiálu PETG povrch o něco zlepšil a po konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že povrch wingletu z PETG má dostačující kvalitu.

Winglet je namodelován tak, že vnější povrch tvoří plochy a vnitřní struktura je tvořena objemovými tělesy o jednotné tloušťce. Takovouto strukturu pak slicer převede na model, který má jednovrstvý plášť a dvojvrstvé vnitřní výztuhy, které jsou s pláštěm pevně spojeny.

První verze žebrování byla navržena spojitě v celém wingletu a odlehčovací otvory, které měly eliptický tvar, nebyly ve struktuře umístěny příliš hustě jak je vidět na levém obrázku. Po vytištění se tato struktura ukázala jako nevhodně zvolená. V horní části wingletu bylo nevyhovující sbíhání výztuh do několika málo bodů, což mimo jiné vedlo k tomu, že se po vytištění propadala vrchní část wingletu. Dále byla nevhodná jejich

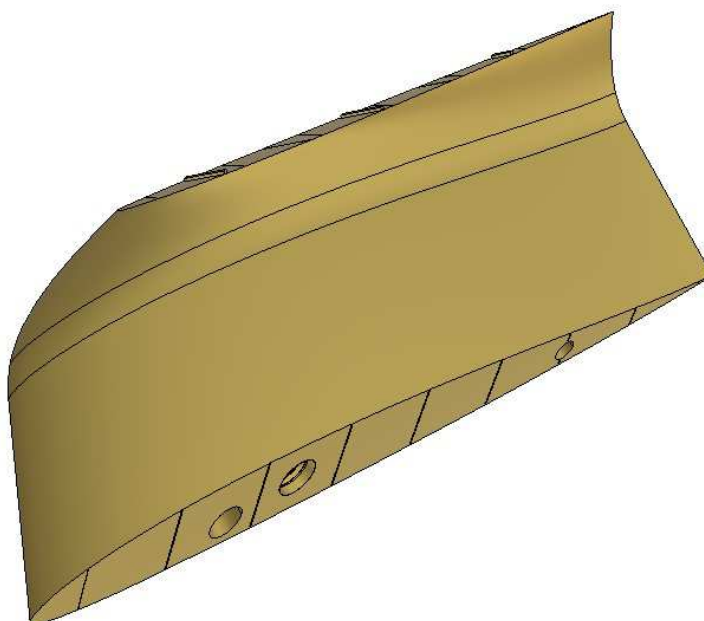
orientace. Proto bylo rozhodnuto vytvořit pro vrchní část wingletu vlastní žebrování, které by bylo nezávislé na žebrování spodní části a ve vrchní části tohoto dílu navíc výztuhy co nejvíce rozvětvit, jak je vidět na pravém obrázku. Navíc bylo využito odlehčovacích otvorů ve tvaru oválů, které žebrování odlehčily lépe než eliptické otvory.



Obrázek 5.2. Vnitřní struktura wingletu

Dobré slepení obou částí wingletu, které nemají navazující vnitřní strukturu, bylo zajištěno přidáním plochy na vrchní část spodního dílu wingletu a tří sesazovacích hranolů patrných na obrázku 5.3. Tato plocha byla do modelu přidána, protože použitý slicer nedokázal vytvořit jednovrstvý perimetr, který by byl v nějakém místě nespojitý. Dále bylo zapotřebí vyřešit uchycení wingletů jak k laminátovému, tak k tištěnému letounu. V obou případech je toto uchycení realizováno pomocí dvou trubiček o průměrech 10 mm a 6 mm a jednoho magnetu. V případě tištěné verze je alternativní řešení přilepit winglet k letadlu stejně jako zbytek dílů. Z důvodu snazší manipulace s letounem ale bylo od tohoto řešení upuštěno.

Kvůli lepšímu spojení trubiček a otvoru pro magnet se zbytkem wingletu bylo v jeho spodní části přidáno kořenové žebro. Poloha trubiček na wingletu kompatibilním s laminátovou verzí se mírně liší od polohy trubiček na wingletu kompatibilním s tištěnou verzí kvůli odlišné poloze křidélek na tištěné části.



Obrázek 5.3. Spodní díl wingletu kompatibilní s laminátovou verzí letounu

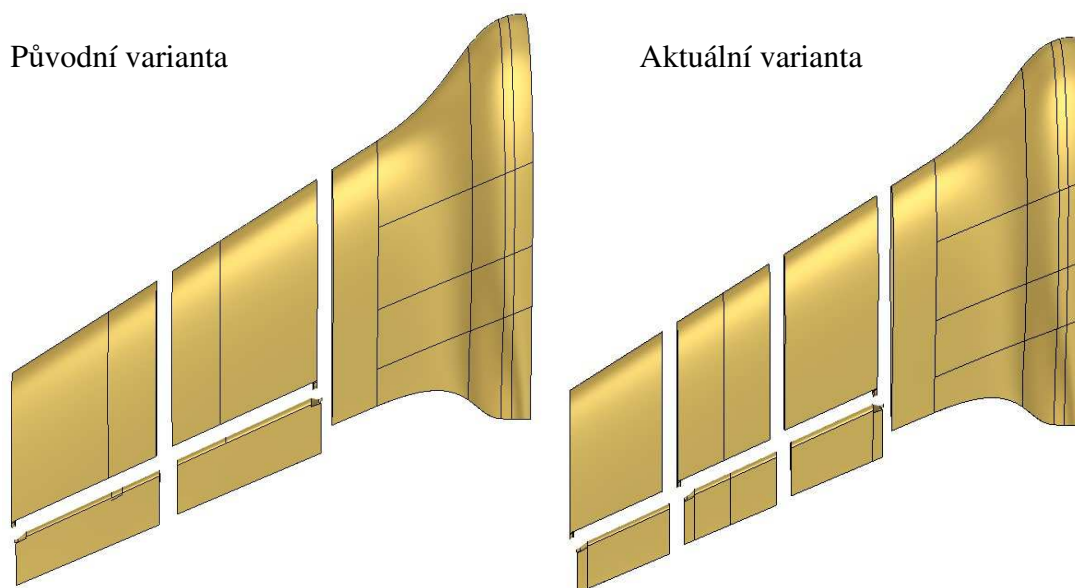
Po vytištění finální verze wingletu byla porovnána hmotnost s laminátovou verzí a tištěný winglet byl navržen zhruba o jednu třetinu lehčí než laminátový. Důvodem je fakt, že v případě laminátové verze je veškerá hmotnost soustředěna ve vnější ploše, která je vzhledem k objemu wingletu poměrně velká. Tištěný winglet má naopak velmi lehkou vnější plochu a jeho nejtěžší částí jsou vnitřní výztuhy, které vyplňují jeho objem.

Možnosti pro další zlepšení tohoto konstrukčního návrhu jsou především v optimalizaci vnitřní struktury.

### 5.3. Křídlo

Další navrženou částí letounu bylo křídlo bezprostředně navazující na winglety.

V prvním kroku bylo křídlo rozděleno na dvě části, které by se tiskly odděleně, jak je vidět na levém obrázku. Tato koncepce ale nakonec využita nebyla. Jedním z důvodů proč nebyla využita, byla snaha o co nejrovnoměrnější rozdělení všech částí mezi obě 3D tiskárny, které byly k dispozici. Kdyby byla tato část letounu rozdělena jen na dvě části, na tiskárnu Prusa i3 by se nevešla ani jedna a skoro celý letoun by se musel tisknout jen na tiskárně Raise3D PRO2, což by bylo časově náročné. Dalším důvodem byla obava o stabilitu poměrně dlouhého křídélka, které by v původní koncepci bylo uchyceno jen ve dvou závěsech a díky tomu by mohlo dojít k jeho nežádoucí deformaci za letu. Proto byla v konečné fázi tato část letounu rozdělena na tři části, jak je vidět na pravém obrázku. Horní dvě části lze tisknout na obou tiskárnách a křídélko je uchyceno ve třech závěsech.



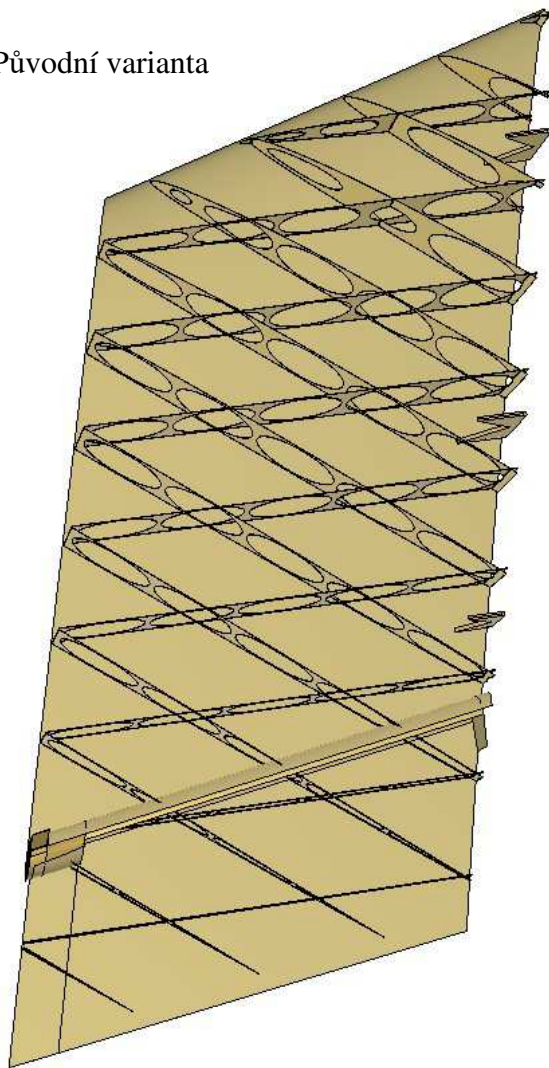
Obrázek 5.4. Tiskové části křídla

Všechny části se tisknou vždy tak, že závěs pro uchycení křídélka leží na tiskové podložce.

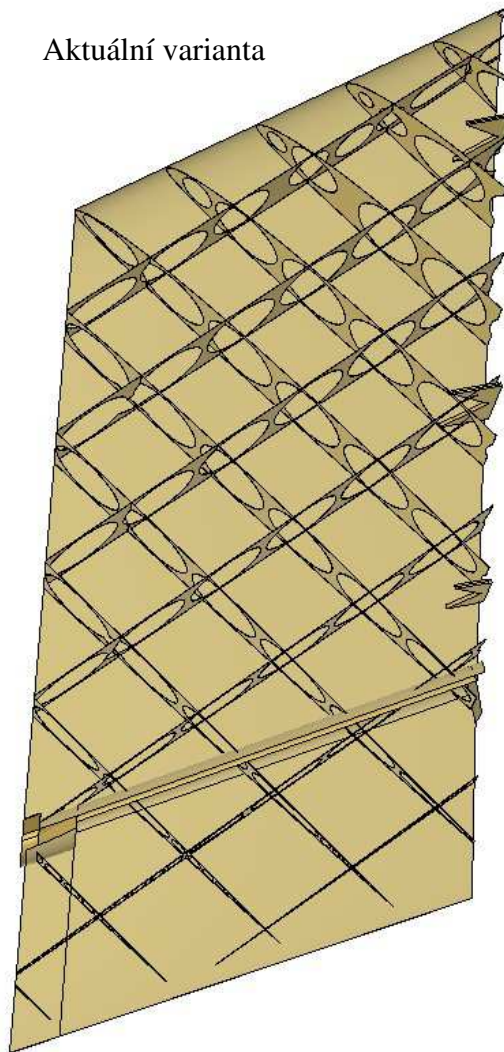
První verze žebrování byla navržena tak, aby byla spojitá s žebrováním wingletu. Tato koncepce, kdy polovina výztuh konstrukce je téměř kolmá na tiskovou podložku, ale špatně odolává zatížení krutem. Křídlo však musí odolávat zatížení kroutícím momentem, aby nedocházelo k reverzaci řízení a jiným nepatřičným jevům. Proto byla nová struktura navržena tak, aby všechny výztuhy svíraly úhel  $50^\circ$  s tiskovou plochou. Úhel  $50^\circ$  byl zvolen, protože všechny části křídla jsou tištěny bez podpor a při malém tiskovém úhlu hrozí zborcení konstrukce při tisku. Tato struktura byla navíc ještě zahuštěna oproti původní struktuře. Plocha kosočtverce, který je vidět při pohledu shora, je asi o 15 % menší, než je plocha kosodélníku využitá v původním návrhu. Výsledná vnitřní struktura je vidět na pravém obrázku.



Původní varianta

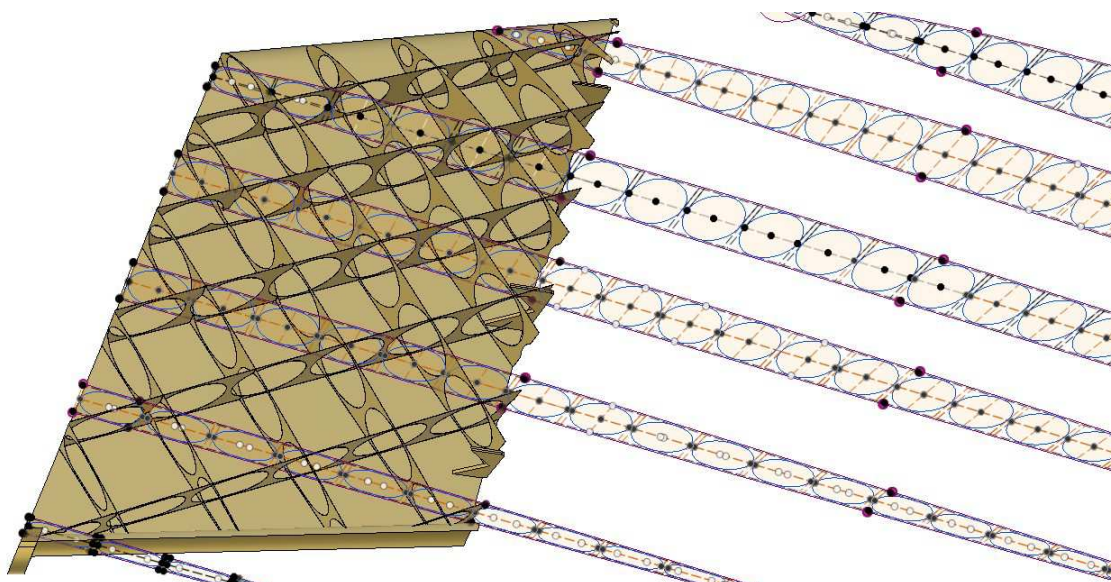


Aktuální varianta



Obrázek 5.5. Vnitřní struktura křídla a křídélka

V obou případech byla použita kombinace oválných, eliptických a kruhových odlehčovacích otvorů. Děrování bylo vytvořeno spojováním jednotlivých elips a oválů, nakreslených na jednotlivých náčrtech, vestavěnou funkcí Loft. Kruhové otvory byly poté doplněny navíc doplněny pomocí vestavěné funkce Hole do okrajových míst, která se nepovedlo naděrovat předchozím způsobem.



Obrázek 5.6. Děrování vnitřní struktury

Při návrhu vhodné struktury byly vyzkoušeny i některé struktury generované automaticky ve sliceru. Mají výhodu, že celá vnitřní struktura je jednovrstvá a tím pádem i lehčí. Manuálně vytvořenou vnitřní strukturu totiž slicer nedokázal převést na jednovrstvou ale pouze na dvojevrstvou. Navíc by odpadlo poměrně pracné vytváření náčrtů s otvory pro děrování. Stačilo by totiž nahrát vnější povrch křídla do sliceru a několika kliknutími nastavit vhodný tvar a hustotu vnitřní výplně, kterou by pak slicer okamžitě nageneroval.

Pro testování byl zvolen vrchní díl křídla a bylo vyzkoušeno několik typů automaticky generované vnitřní výplně. Jako nejlepší automaticky generovaná struktura se ukázala struktura Cubic.

Tabulka 5.1. Porovnání hmotnosti jednotlivých typů vnitřní struktury

Ručně vytvořená struktura	[g]	49
Automatická vnitřní výplň A	[g]	49
Automatická vnitřní výplň B	[g]	43
Automatická vnitřní výplň C	[g]	73
Automatická vnitřní výplň D	[g]	49

Výsledkem tohoto pokusu bylo zjištění, že se vyplatí vytvářet vnitřní strukturu manuálně. Při dosažení zhruba stejné hmotnosti automaticky generovaných a ručně kreslených vzorků vykazovaly automaticky vytvořené vzorky mnohem nižší pevnost. Otevírá se tu ale zajímavá možnost pro další optimalizaci tohoto konstrukčního návrhu tím, že by se zkombinovaly některé výhodné vlastnosti obou přístupů. Zajímavé výsledky by mohla nabízet kombinace jednovrstvých manuálně vytvořených výztuh, popřípadě nějaká forma automaticky generované dvojevrstvé děrované struktury.

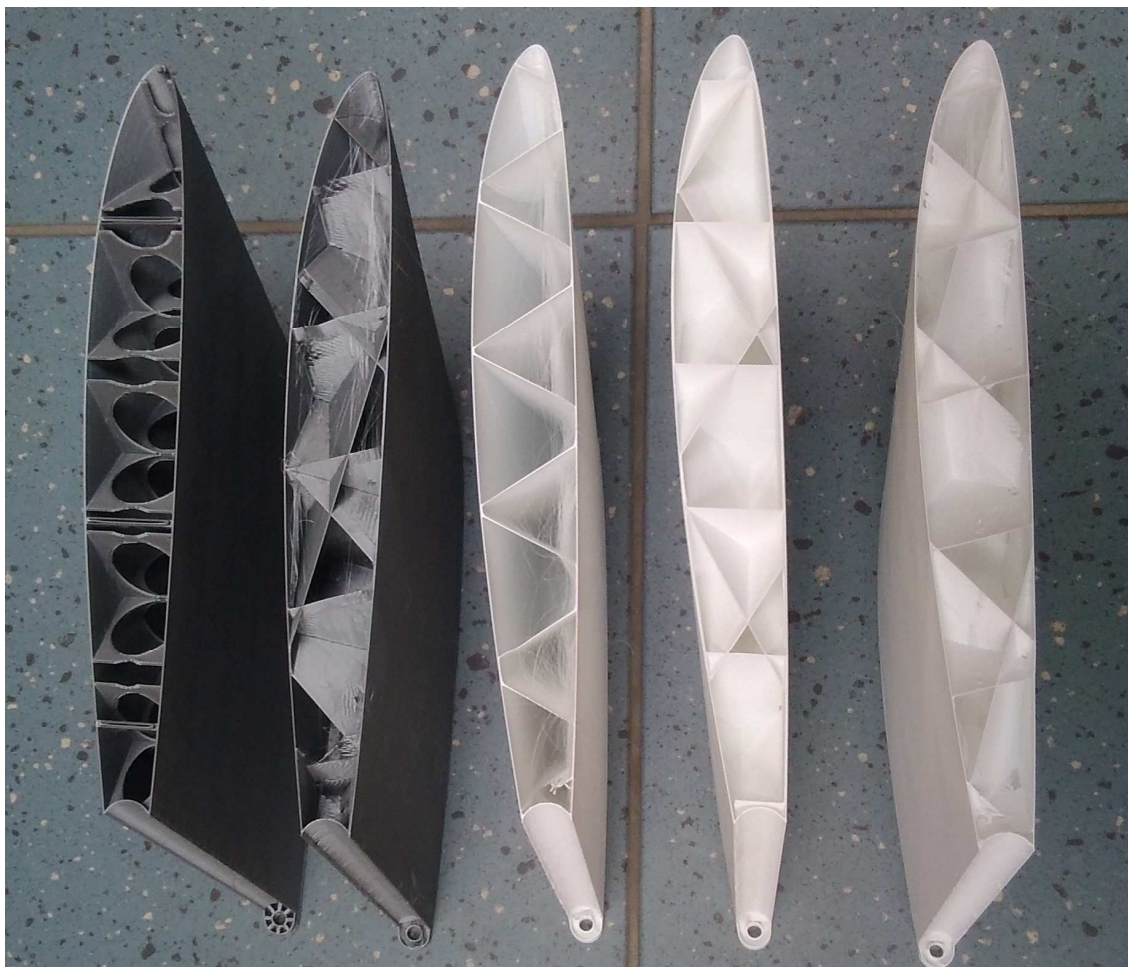
Ručně  
vytvořená

A

B

C

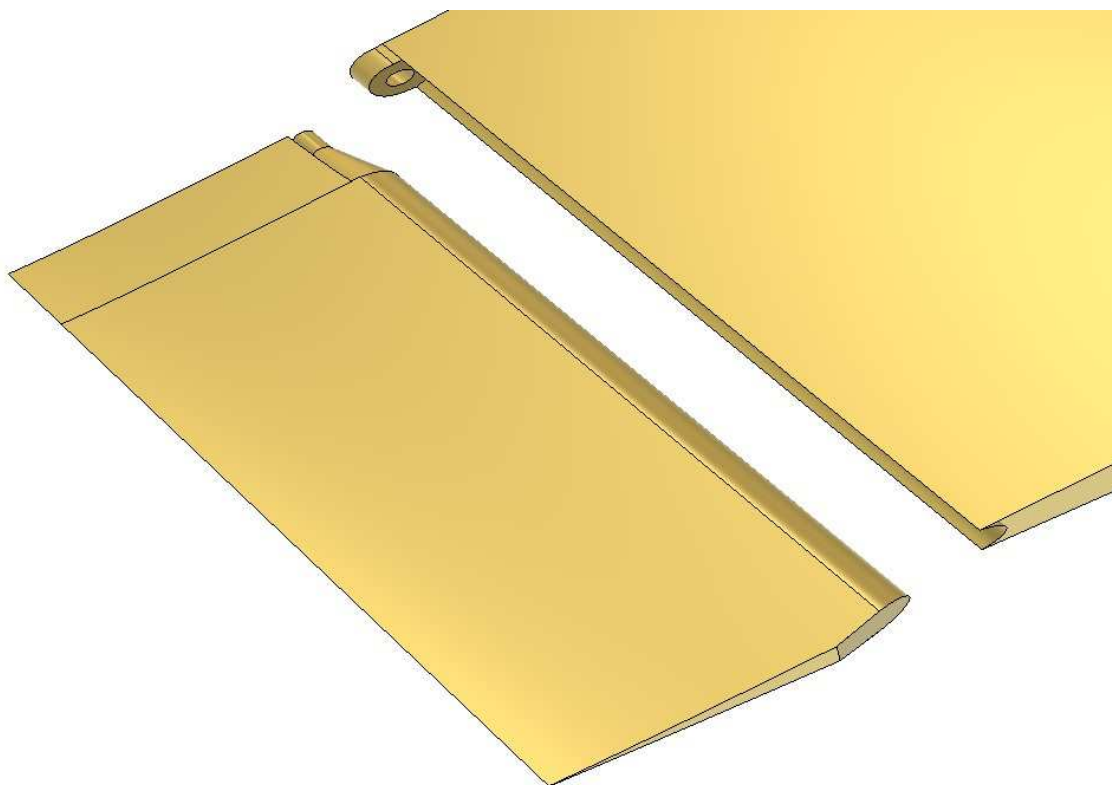
D



Obrázek 5.7. Ručně vytvořená struktura a automaticky generované struktury

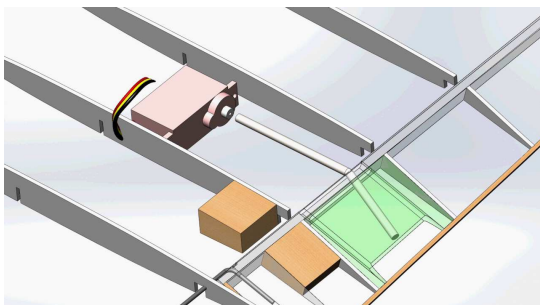
Dále bylo potřeba vyřešit uchycení křídélka ke zbytku křídla. Byla zvolena taková koncepce, kdy na konci křídélka byla vytvořena půlkružnice, která se pohybuje v eliptickém pouzdře na křídle. Na horní konec každého dílu křídélka byl poté namodelován čep, který se zasune do závěsu na křídle. Jediná menší kolize nastala u vrchního dílu křídélka, které při pohybu naráželo do závěsu na středním dílu křídla. Proto musela být tato část křídélka mírně zkosena a při tisku bylo nutno využít podpory. Toto je jediná část křídla, kde byly podpory využity, zbytek lze vytisknout bez podpor.



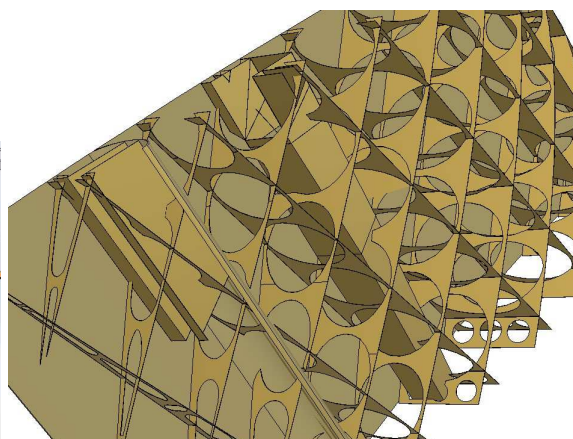


Obrázek 5.8. Detail vrchní části křídla

Také bylo potřeba zabudovat do křídla servo, které by ovládalo výchylku křídélka. Bylo rozhodnuto využít rotary drive system (RDS). Ten má oproti standardnímu spojení serva s křídélkem výhodu, že z letounu nemusí vyčnívat žádné speciální úchyty a do 3D tištěné koncepce ho lze snadněji zabudovat. Do spodního dílu křídla byla zabudována kapsa, do které se servo zalepí. Kvůli vyšší tuhosti uložení kapsy bylo po jejím obvodu vytvořeno několik žebírek, které ji spojují přímo s potahem letounu. Na kapsu plynule navazovala trubička, kterou je veden kabel dále do střední části letounu. Tato trubička má dvě základní funkce. Je nutná k tomu, aby se kapsa, která je posazená na jejím vrcholu, při tisku nikde nepropadla a byla dobře usazena v prostoru. Navíc je také uživatelsky mnohem příjemnější prostrčit kabel od serva připravenou trubičkou a nemuset ho protahovat skrz děrované výztuhy. Přímo naproti kapse byla do křídélka zabudována drážka, ve které se bude pohybovat zakončení RDS systému.



Obrázek 5.9. RDS systém [32]



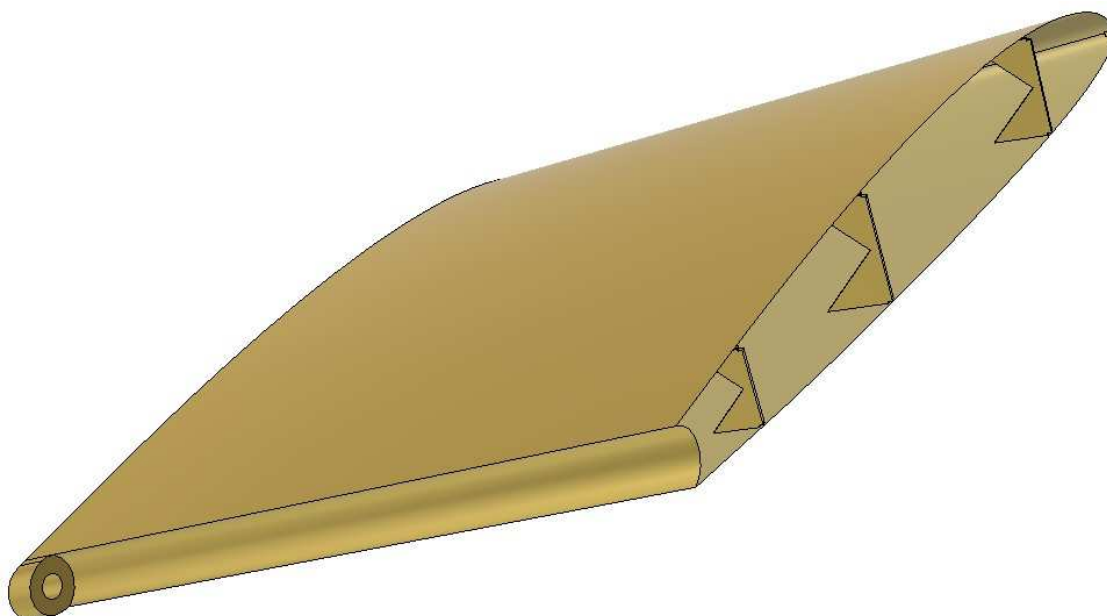
Obrázek 5.10. Uložení RDS systému



---

Spojení wingletů a křídla je zajištěno uhlíkovými trubičkami a magnetem tak, jak je to popsáno v předchozí kapitole. Z důvodu lepšího uchycení trubiček a otvoru pro magnet bylo i zde k vrchnímu dílu křídla přidáno kořenové žebro.

Snadnější slepení jednotlivých částí křídla zajistí sesazovací výstupky vymodelované v horní části každého dílu křídla. Základnou těchto výstupků jsou dva trojúhelníky, které se postupně sbíhají k sobě. Vrchní hrana tohoto tělesa poté vyčnívá nad zbytek dílu.



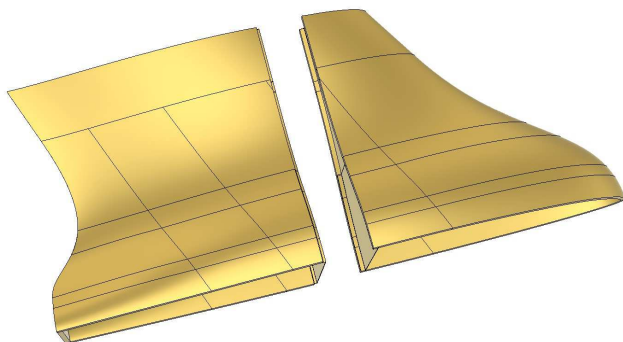
Obrázek 5.11. Detail spojovacích výstupků

Možnosti pro další zlepšení tohoto konstrukčního návrhu jsou především v optimalizaci vnitřní struktury nebo ve zlepšení návrhu ovládání křidélek.

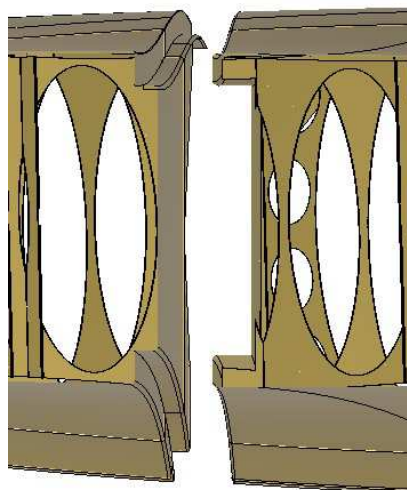
## 5.4. Centroplán

Poslední navrhovanou částí letounu byl centroplán.

Bylo rozhodnuto rozdělit centroplán na dvě části. Rozdíl oproti předchozímu dělení letounu spočívá v tom, že centroplán není rozdělen řezem v rovině profilu, ale řezem kolmým na rovinu profilu. Bylo proto nutné využít odlišný typ sesazení těchto dvou částí, než jaký byl využit v křídle a wingletech. Místo sesazovacích výstupků byla v jedné části letounu vymodelována prohlubeň, která kopírovala tvar plochy řezu a v druhé polovině byl namodelován výstupek odpovídajícího tvaru tak, aby šly obě části snadno sesadit.



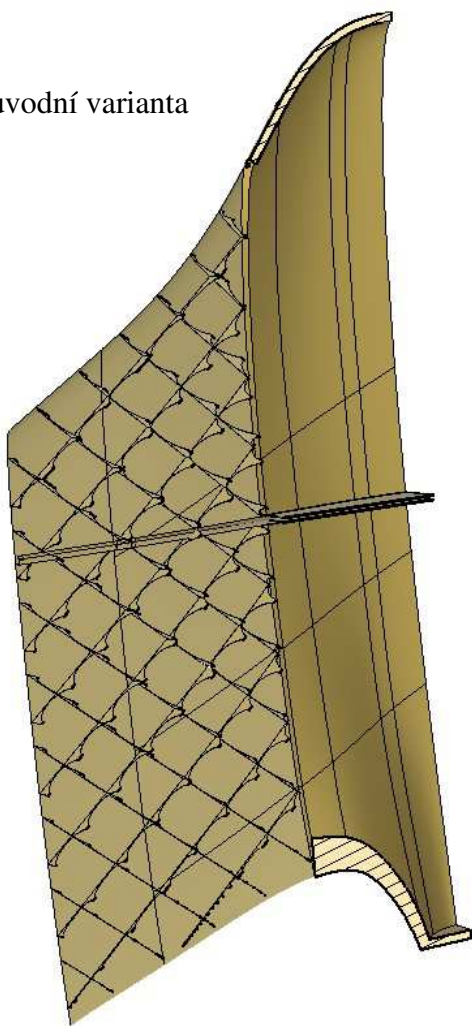
Obrázek 5.12. Tiskové části centropłanu



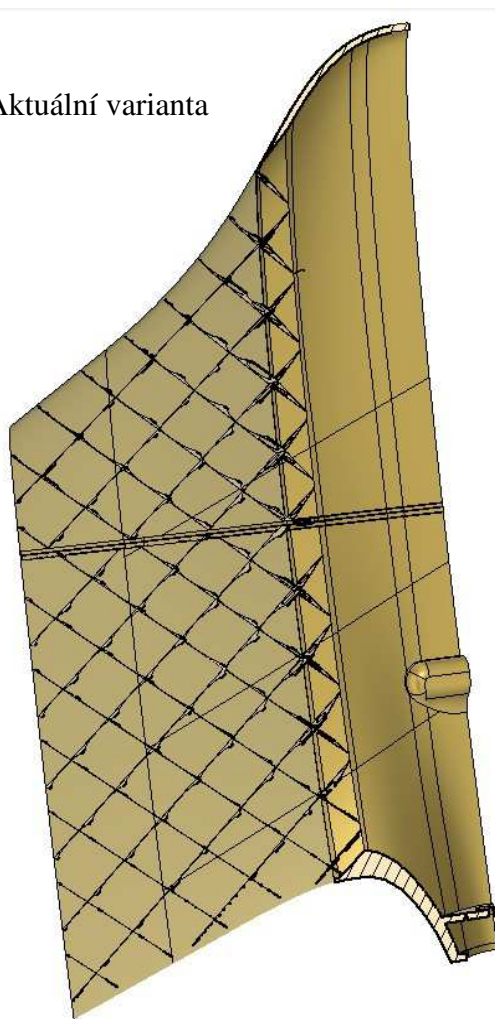
Obrázek 5.13. Detail sesazení obou částí

Dalším rozdílem oproti předcházejícímu návrhu křídla a wingletů je to, že prvních 100 mm od středu letounu ke křídlu není namodelováno jako klasická plocha s žebrováním uvnitř, ale jako skořepina bez jakéhokoli žebrování. V této části letounu se bude nacházet užitečný náklad. V původním návrhu měla skořepina tloušťku 5 mm a po úpravě byla tloušťka zmenšena na 4 mm. Zbytek obou částí je poté namodelován stejným způsobem jako winglety a křídlo. Přechod mezi těmito dvěma částmi modelu byl nejprve řešen jen nespojitě tak, že na hranici obou částí se stýkala skořepina plné tloušťky s jednovrstvým potahem, ze kterého rovnou vyrůstalo vnitřní žebrování, jak je vidět na levé části obrázků 5.14. a 5.15. Tato koncepce byla kvůli zlepšení mechanických vlastností přepracována tak, že posledních 20 mm skořepiny se postupně zužuje až na tloušťku dvou vrstev a zároveň z této skořepiny začíná vyrůstat vnitřní struktura, jak je vidět na pravé části obrázků 5.14. a 5.15.

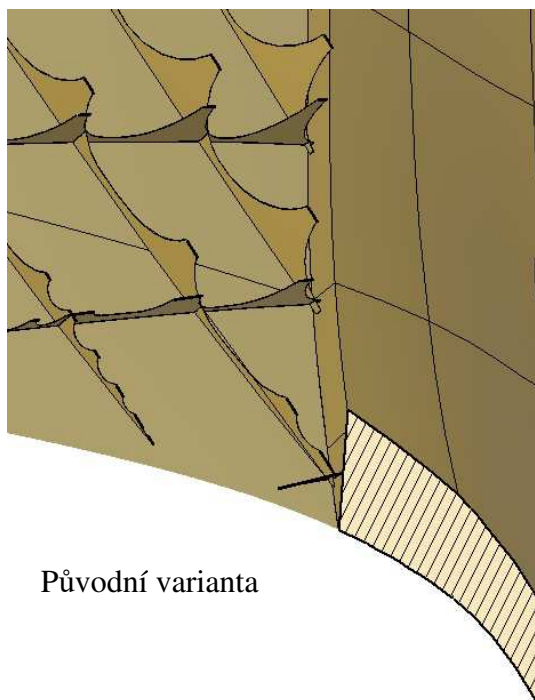
Původní varianta



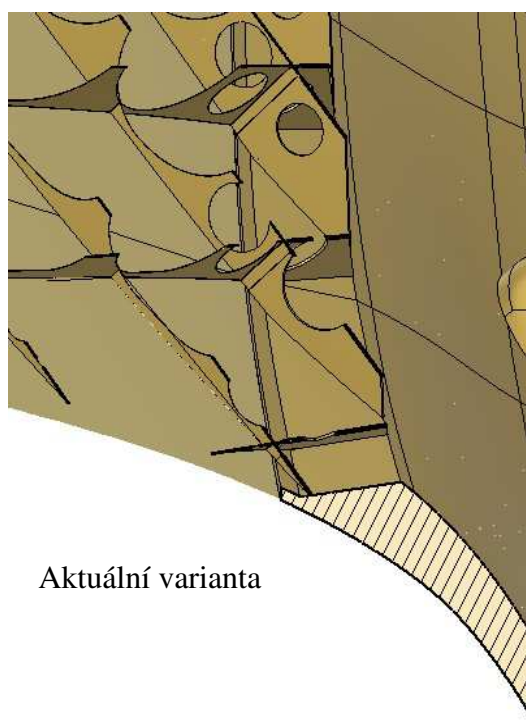
Aktuální varianta



Obrázek 5.14. Řez centroplánem



Původní varianta



Aktuální varianta

Obrázek 5.15. Detail přechodu mezi žebrovanou a skořepinovou částí letounu

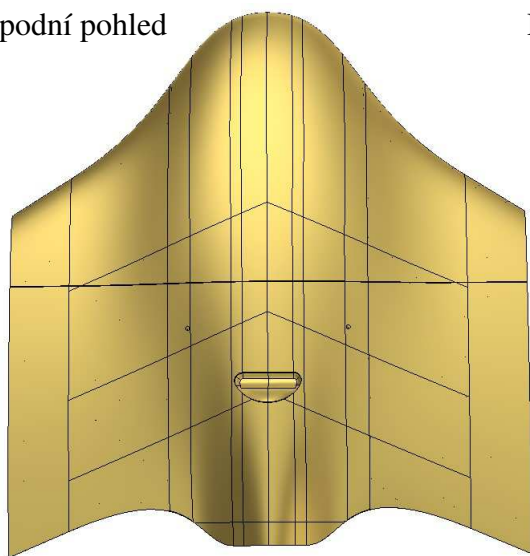
V průběhu času byla také měněna hustota vnitřní výplně. Původní návrh počítal s výplní 20 %, což se ukázalo jako zbytečné předimenzování a hustota vnitřní výplně skořepinové části trupu byla snížena až na současných 5 %. Tvar vnitřní výplně se velmi blíží výplni typu Cubic, která vyšla jako nejlepší v testování výplní křídla.

Žebrování vrchní části centroplánu plynule navazuje na žebrování v křídle a je vytvořeno stejným způsobem.

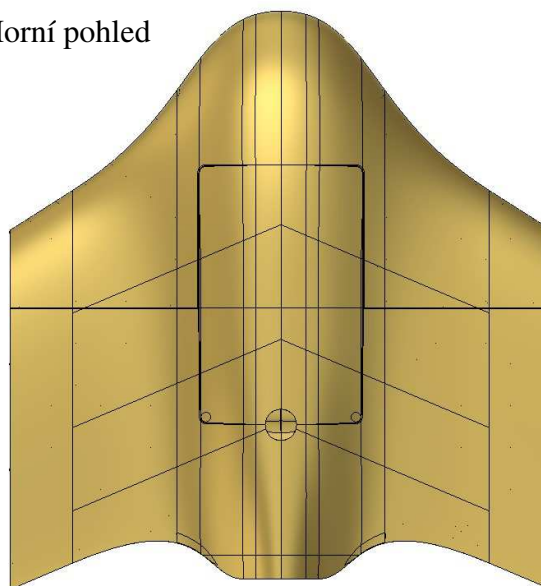
Ve spodní části letounu se nachází úchyt pro snadnější odhození letounu při startu. K laminátové verzi letounu byl dodán až následně, v tištěné verzi už je neoddělitelnou součástí konstrukce.

Pro snadnější vyvážení se na spodní části letounu, 215 mm od zadní hrany, nacházejí dva malé výstupky, mezi kterými se nachází těžiště.

Spodní pohled

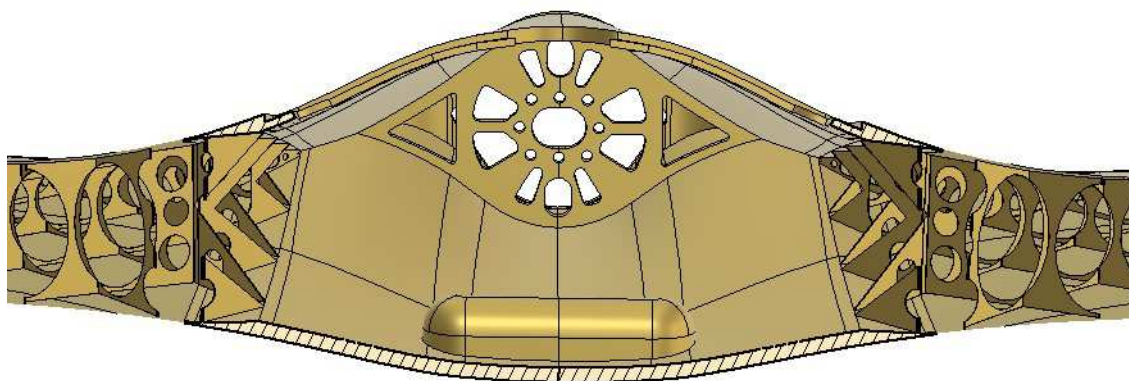


Horní pohled



Obrázek 5.16. Spodní a horní pohled na centroplán

Motor je umístěn v zadní části letounu a je přimontován ke speciální motorové přepážce. V této přepážce, která vychází z přepážky laminátového letounu byly zvětšeny některé otvory pro kabely tak, aby bylo zajištěno snazší osazení motoru.



Obrázek 5.17. Řez centroplánem

V horní části letounu se nachází odnímatelný kryt, který je k letounu připojen pomocí jedné pacičky a magnetů. Velikost krytu byla zvolena přibližně stejná jako na laminátové verzi letounu a pro snadnější odnímání je na druhém konci vytvořen kruhový otvor. Hustota vnitřní výplně krytu byla oproti okolním částem letounu snížena až na 3 %, aby bylo dosaženo maximálního odlehčení letounu. Kryt je dobře vidět na obrázku 5.16. Aby bylo možno vytisknout takovýto otvor, bylo zapotřebí ve sliceru nastavit využití tiskových podpor v prvních 100 milimetrech výšky obou dílů. Výška 100 mm byla zvolena tak, aby se podpory automaticky nenagenerovaly do žebrované struktury, ze které by šly jen velmi špatně odstranit.

Možnosti pro další zlepšení tohoto návrhu jsou především v optimalizaci hmotnosti celé konstrukce a ve využití různých tvarových prvků jako je například NACA vstup.

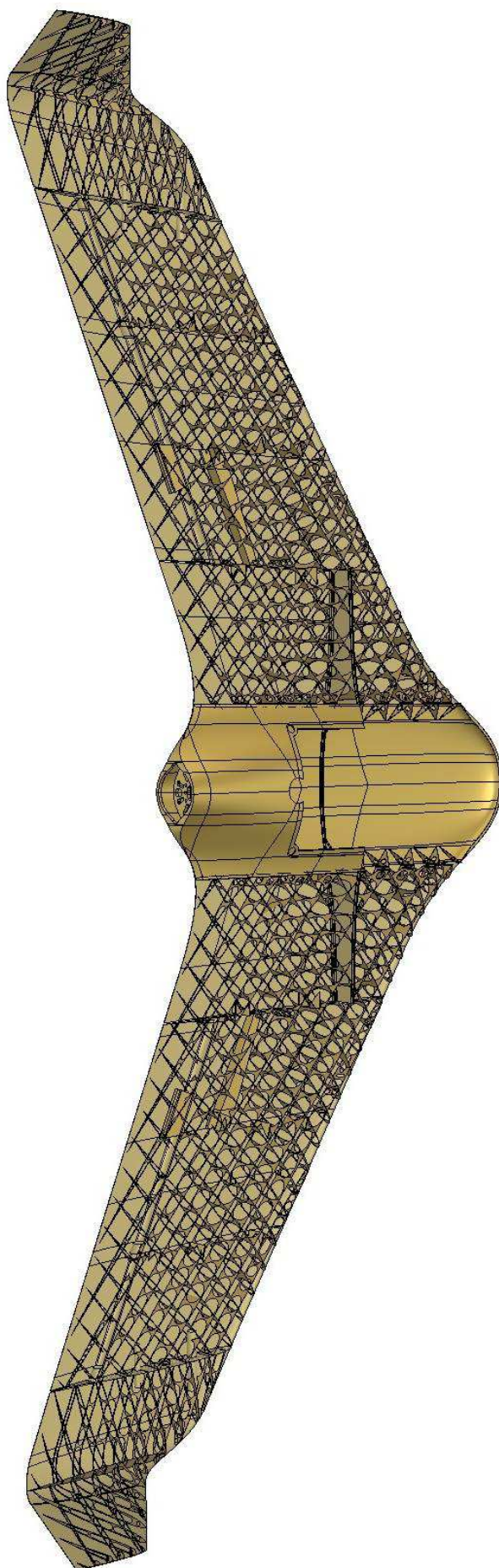
## 5.5. Sestavení letounu

Po vytištění bylo třeba jednotlivé díly začistit a upravit. Ze střední části letounu bylo zapotřebí odstranit přídavné podpěry a pomocí brusného papíru začistit sesazovací plochy tak, aby bylo možno centroplán správně slepit. Brusným papírem se také začišťovalo pohyblivé uložení křidélek na křídlech. Do křídel a křidélek bylo navíc nutno vytvořit otvory pro RDS systém ovládání křidélek.

Letoun byl slepen pomocí epoxidového lepidla. Do wingletů byly zalepeny uhlíkové trubičky a magnety, které budou sloužit pro uchycení wingletů ke zbytku letounu.

Na závěr byl letoun osazen veškerou potřebnou elektronikou.





Obrázek 5.18. Výsledný konstrukční návrh bezpilotního letounu VUT 714 určený ke 3D tisku

---

## 6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit konstrukční návrh bezpilotního prostředku vyráběného technologií FDM.

V prvních částí této práce byl stručně popsán samotný letounu VUT 714 a byly zde ve zkratce představeny některé metody 3D tisku.

Druhá část této práce se věnovala řešení bezpilotních prostředků vyráběných aditivní technologií a bylo zde předloženo několik funkčních konceptů, ze kterých bylo možno vycházet při samotném návrhu letounu VUT 714. V závěru této kapitoly se nacházelo základní srovnání jednotlivých konceptů.

Poslední část této práce se již věnovala samotnému konstrukčnímu návrhu letounu VUT 714. Byl zde popsán a obrazově dokumentován průběh návrhu dvou typů wingletů, průběh návrhu křídla a uchycení křidélek a v neposlední řadě i průběh návrhu střední části letounu. V závěru této kapitoly se poté nacházel odstavec věnovaný výslednému sestavení jednotlivých částí letounu.

Samotný letoun byl sestaven a v nejbližší době projde letovými zkouškami.

---

## 7. Seznam použitých zdrojů

- [1] Funkční vzorek bezpilotního systému VUT 714. *Botanický ústav AV ČR* [online]. 2017 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.ibot.cas.cz/wp-content/uploads/2017/03/funkcni-vzorek.pdf>
- [2] Technologie 3D tisku. *PKmodel* [online]. Praha, 2006 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://pkmodel.cz/3dtisk.html>
- [3] COWARD, C. 3D printing. New York, USA: Alpha, 2015. ISBN 978-1615647446
- [4] KREJBYCHOVÁ, A. *Analýza mechanických vlastností plastových dílů realizovaných 3D tiskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Vosynek, Ph.D. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/99937>
- [5] Fused Deposition Modeling. *FDM MANUFACTURING GUIDE* [online]. 2018 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>
- [6] Manuál stavby RC modelů. *RONY-SOFT model Rokycany* [online]. 2003 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: [http://lmkletnany.cz/users\\_data/files/literatura/manual-stavby-rc-modelu.pdf](http://lmkletnany.cz/users_data/files/literatura/manual-stavby-rc-modelu.pdf)
- [7] Sulsa. *Sotonav UAV* [online]. Southampton, 2017 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.sotonuav.uk/platforms/sulsa/>
- [8] Southampton engineers fly the world's first printed aircraft. *University of Southampton* [online]. Southampton, 28-06-2011 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: [https://www.southampton.ac.uk/engineering/news/2011/07/28\\_southampton\\_engineers\\_fly\\_the\\_worlds\\_first\\_printed\\_aircraft.page#\\_ga=2.91675610.1314229024.1551708908-1302214407.1551708908](https://www.southampton.ac.uk/engineering/news/2011/07/28_southampton_engineers_fly_the_worlds_first_printed_aircraft.page#_ga=2.91675610.1314229024.1551708908-1302214407.1551708908)
- [9] Royal Navy uses pilotless aircraft to navigate through ice. *University of Southampton* [online]. Southampton, 15-04-2016 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.southampton.ac.uk/news/2016/04/sulsa-uav-royal-navy-antartica.page>
- [10] Southampton engineering students design first-ever 3D-printed, rocket-powered space plane. *University of Southampton* [online]. Southampton, 24-11-2014 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: [https://www.southampton.ac.uk/engineering/news/2014/10/24\\_engineering\\_students\\_design\\_first\\_3d\\_printed\\_rocket\\_powered\\_space\\_plane.page#\\_ga=2.256808779.1314229024.1551708908-1302214407.1551708908](https://www.southampton.ac.uk/engineering/news/2014/10/24_engineering_students_design_first_3d_printed_rocket_powered_space_plane.page#_ga=2.256808779.1314229024.1551708908-1302214407.1551708908)
- [11] FDM Printed Fixed Wing UAV. *The University Of Sheffield, Advanced Manufacturing Research Centre, Boeing* [online]. 2019 [cit. 2019-03-10].



---

Dostupné z:  
[https://www.amrc.co.uk/files/document/51/1480436295\\_FDMprintedfixedwingUAV.pdf](https://www.amrc.co.uk/files/document/51/1480436295_FDMprintedfixedwingUAV.pdf)

- [12] Taking Off with 3D Printing. *3D PRINTING FOR BEGINEERS* [online]. 10-06-2014 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://3dprintingforbeginners.com/taking-off-with-3d-printing/>
- [13] Barcelona 3D Printed UAV. *Fab Lab Connect* [online]. 2018 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.fablabconnect.com/barcelona-3d-printed-uav/>
- [14] Barcelona 3D Printed UAV. *Thingiverse* [online]. 17-05-2014 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:334271>
- [15] Shaping The Future of Flight. *Aurora Flight Sciences* [online]. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: [https://www.stratasys.com/-/media/files/case-studies/aerospace/cs\\_fdm\\_ae\\_aurora.pdf](https://www.stratasys.com/-/media/files/case-studies/aerospace/cs_fdm_ae_aurora.pdf)
- [16] UAV Takes Flight with 80 Percent 3D-Printed Parts. *ADDITIVE MANUFACTURING* [online]. 16-11-2015 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/uav-takes-flight-with-80-percent-3d-printed-parts>
- [17] Aurora Flight Sciences and Stratasys Deliver World's First Jet-Powered, 3D Printed UAV in Recor Time. *Business Wire A Berkshire Hataway Company* [online]. 09-11-2015 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.businesswire.com/news/home/20151109005240/en/>
- [18] THOR The printed plane flies - 3D printing takes off. *FUTURE.HAMBURG* [online]. Hamburg, 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://future.hamburg/en/project/thor/>
- [19] Airbus tests high-tech concepts with an innovative 3D-printed mini aircraft. *Airbus* [online]. 13-06-2016 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/06/airbus-tests-high-tech-concepts-with-an-innovative-3d-printed-mini-aircraft.html>
- [20] Airbus 3D-Printed Mini Aircraft Becomes a Testbed for Future Technologies. *WORLD INDUSTRIAL REPORTER* [online]. 28-06-2016 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://worldindustrialreporter.com/airbus-3d-printed-mini-aircraft-becomes-testbed-future-technologies/>
- [21] Airbus Officially Unveils Thor, the FULLY 3D Printed Plane that Flies Beautifully. *3DPRINT.COM The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing* [online]. 06-06-2016 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://3dprint.com/137389/airbus-thor-3d-printed-plane/>

- 
- [22] About. *3DLabPrint* [online]. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://3dlabprint.com/about/>
- [23] ZIVKO EDGE HANNES ARCH REPLICA. *3DLabPrint* [online]. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://3dlabprint.com/shop/zivko-edge-hannes-arch-replica/>
- [24] Nomad, an FPV/UAV 3D printed airplane. *Thingiverse* [online]. 15-03-2014 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:272478>
- [25] 3D-Printed Drone Designed by U.S. Marine Corporal Costs 200x Less Than Models Currently in Use. *ADDITIVE MANUFACTURING* [online]. 9-8-2017 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/news/3d-printed-drone-designed-by-us-marine-corporal-costs-200-less-than-models-currently-in-use>
- [26] The Marine Corps wants to 3D print cheaper drones. *POPULAR SCIENCE* [online]. 13-11-2017 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.popsci.com/marine-corps-3d-printed-drones>
- [27] Fusion 360 zdarma a s českým návodem. *CAD.cz* [online]. 2017 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/pr/87-pr/7787-fusion-360-zdarma-a-s-ceskym-navodem.html>
- [28] Autodesk Fusion 360 – cloudový 3D CAD/CAM/CAE. *Cadstudio* [online]. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.cadstudio.cz/fusion360>
- [29] 3D TISKÁRNA ORIGINAL PRUSA I3 MK3S. *PRUSA RESEARCH* [online]. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/original-prusa-i3-mk3/>
- [30] ORIGINAL PRUSA I3 MK3S. *PRUSA RESEARCH* [online]. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>
- [31] RAISE3D PRO2 PLUS 3D TISKÁRNA. *EDM3D* [online]. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://eshop.edm3d.cz/hardware-raise3d/736-raise3d-pro2-plus-3d-tiskarna.html>
- [32] RDS servo test2. *Youtube* [online]. 11-5-2016 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=y3wm-umY4Lc>